

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Konstrukce neúnikových pájených spojů, pro použití v prototypové výrobě  
výměníků pro automobilový průmysl

Autor: **Vojtěch JINDRA**  
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Kořínek**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch JINDRA**  
Osobní číslo: **S19B0059K**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**  
Téma práce: **Konstrukce neúníkových pájených spojů, pro použití v prototypové výrobě výměníků pro automobilový průmysl**  
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

### Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Navrhnout optimální design konstrukce pájeného spoje výměníku, který bude používán v rámci prototypové fáze vývoje výměníku. Najít nejlepší variantu spoje, pro tři různé varianty spojů.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Úvod do problematiky
2. Teoretické základy a rešerše literatury
3. Konstrukční řešení
4. Experimentální část práce
5. Zhodnocení, závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran A4**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

HOSNEDL, STANISLAV, KRÁTKÝ, JAROSLAV *Příručka strojního inženýra – Obecné strojní části I.* : Computer Press, 2002

CHYSKÝ, JAROSLAV, HEMZAL, KAREL *Větrání a klimatizace.* Praha: Bolit-B, 1993

VALEO *Multi-Channels Evaporator 38mm „Lucie“ Functional Specifications.* : , 2015

PODKLADOVÝ MATERIÁL, VÝKRESY, KATALOGY, APOD. POSKYTNUTÉ ZADAVATELEM ÚKOLU . : ,

*Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kořínek**  
Katedra konstruování strojů

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Lukáš Kopal**  
Valeo výměníky tepla k.s.

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2020**



**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2019

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> JINDRA	<b>Jméno</b> Vojtěch
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 „Dopravní a manipulační technika“	
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Kořínek	<b>Jméno</b> Jiří
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS	
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Konstrukce neúnikových pájených spojů, pro použití v prototypové výrobě výměníků pro automobilový průmysl	

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	65	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	64	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí pevného, neúnikového, pájeného spoje pro využití v prototypové výrobě výparníků. Hlavním cílem bylo určit, nejlepší možnou variantu pro několik druhů spojů. Výsledky budou použity pro zaštitění technologií výroby v prototypové laboratoři a pro vytvoření metodiky pro přípravu vzorků pro metalografické testy.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Výparník, clad, klimatizace, flux, pájení natvrdo

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname JINDRA	Name Vojtěch
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 “Transport and handling machinery“	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kořínek.	Name Jiří
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>BACHELOR</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Construction of brazed connections without leaks, for use for prototype heat exchangers in automotive industry	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	65	<b>TEXT PART</b>	64	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This bachelor thesis is focused on construction of solid connection without leaks after brazing, to be used in prototype fabrication of evaporators. Main goal was to determine from several technologies of brazed connections, the best possible connection from tests.</p> <p>Outcome will be used as solid facts for customers of used technology in prototype shop and for creation of process for preparation of samples for metallographic tests.</p>
<b>KEY WORDS</b>	Evaporator, clad, car air conditioning, flux, brazing

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval především Ing. Jiřímu Kořínkovi za odborné vedení práce, ochotu a cenné rady. Dále patří poděkování Ing. Lukáši Kopalovi za poskytnuté zdroje informací a odbornou konzultaci. V neposlední řadě děkuji členům své rodiny a také všem, kteří mi při psaní bakalářské práce pomohli.

## **Vysvětlení názvů:**

HVAC = Heating, Ventilation, and Air Conditioning  
– Celá klimatizační jednotka

MPa = Megapascal  
– Jednotka tlaku

mm = milimetr  
– Jednotka délky

N = Newton  
– Jednotka síly

Bar = Bar  
– Jednotka tlaku

## **Použité specifikace požadavků u tabulky:**

BRDS = Banned, Regulated and declared Substances  
– Databáze zakázaných, omezených a deklarovaných látek společnosti Valeo

IMDS (International Material Data System)  
– Systém materiálových dat pro automobilový průmysl,  
globální standard pro značky po celém světě.

PDTNVP 50040 Rev. C.02  
– Valeo norma pro výparníky LUCIE 38 mm



## Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Valeo výměníky tepla k.s. ....	10
1.2	Důvod řešení úlohy .....	11
2	Výparníky .....	12
2.1	Motivace pro používání klimatizace .....	12
2.2	Popis výparníku.....	12
2.3	Princip funkce výparníku .....	14
2.4	Historie pájených výparníků .....	14
2.4.1	Generace – DESIRE.....	15
2.4.2	Generace – CLOE .....	15
2.4.3	Generace – KE – 8 .....	16
2.4.4	Generace – LUCIE.....	17
2.5	Chladiva do klimatizací.....	18
2.5.1	Historický přehled.....	18
2.5.2	Výhody použití CO <sub>2</sub> jako chladiva.....	20
2.5.3	Potenciál globálního oteplování .....	21
3	Chladicí oběh .....	22
3.1	Chladicí oběh s dvoufázovým médiem .....	24
4	Pájené spoje tepelných výměníků .....	25
4.1	Výhody hliníkových tepelných výměníků .....	25
4.2	Konstrukce hliníkových tepelných výměníků .....	26
4.3	Výroba pájených, hliníkových výměníků .....	27
4.4	Materiály hliníkových, pájených, tepelných výměníků.....	29
4.4.1	Finy .....	30
4.4.2	Válcovaný materiál s cladem i bez cladu pro headry a desky .....	30
4.4.3	Protlačované trubky .....	32
5	Příprava materiálů pro experimenty .....	33
5.1	Analýza šířky cladu na vzorcích .....	33
5.1.1	Plech s 5% šířkou cladové vrstvy .....	33
5.1.2	Plech s 7,5% šířkou cladové vrstvy .....	34
5.1.3	Plech s 11% šířkou cladové vrstvy .....	35
5.2	Příprava plechů a trubek na testy .....	36
5.3	Flux .....	38
5.4	Pasty a pájecí kroužky.....	39
6	Pájení vzorků .....	41
6.1	Základová deska a skrze ní připájené trubky .....	42
6.2	Základová deska a k ní připájený „M“ profil .....	46
6.3	Základové desky a mezi nimi pasty nebo 2 druhy cladu .....	47
7	Vyhodnocování vzorků .....	49
7.1	Pájené spoje trubkových variant .....	52
7.1.1	Nespájené varianty trubkových variant .....	52
7.1.2	Trubky z materiálu Al 3003 .....	53
7.1.3	Trubky z materiálu Al 6063 .....	55
7.2	Pájené spoje „M“ profilů.....	57
7.2.1	Levý spoj.....	58
7.2.2	Prostřední spoj.....	59
7.2.3	Pravý spoj.....	59
7.3	Pájené spoje rovných desek.....	60
8	Závěr .....	62
9	Použité zdroje.....	63
10	Seznam příloh .....	64
	Příloha č. 1 .....	I

# 1 Úvod

## 1.1 Valeo výměníky tepla k.s.

Tato bakalářská práce byla zpracována pro firmu Valeo výměníky tepla k.s., která sídlí ve Středočeském kraji ve městě Žebrák.



obr. 1-1: Logo společnosti Valeo[1]

Firma jako taková vznikla v roce 1923 nedaleko Paříže pod jménem SAFF „*Société Anonyme Française de Ferodo*“. Původně začala svoji dráhu s výrobou brzdových komponent. V roce 1962 převzala společnost SOFICA „*Société de Fabrication Industrielle de Chauffage et d’Aération*“, díky tomu získala přístup ke znalostem v oblasti výměníků tepla. V této oblasti jsou dnes jedním z největších dodavatelů automobilek po celém světě. Například BMW, PSA Group, Daimler, Volkswagen Group a další. V roce 1980 se společnost z důvodu sjednocení všech odvětví pod jednu značku přejmenovala na Valeo.

Název „Valeo“ je latinský výraz, který v překladu znamená „Je mi dobře“.

V České republice se nacházejí tři výrobní závody – V Humpolci, Žebráku a Rakovníku. V Praze se nachází jedna vývojová pobočka.

Závod v Žebráku, který byl postaven v roce 2001, patří do obchodní skupiny Termální systémy. Tento podnik se zabývá vývojem a výrobou výparníků do klimatizačních systémů, které jsou montovány do automobilů značek z celého světa. Dále se zde také vyrábějí EGR chladiče pro motory automobilky VOLVO Group. Momentálně je zde zaměstnáno více než 900 lidí.

## 1.2 Důvod řešení úlohy

Podnětem k vypracování této úlohy bylo snížení nákladů na prototypovou výrobu výparníků. Momentálně se využívá v prototypové výrobě několik variant technologií, které se používají pro výrobu výparníkových prototypů. Proto je hlavním důvodem vyzkoumat, která z technologií bude nejlépe splňovat požadavky na délku spoje a nízké množství porozit u pájeného spoje.

Tím se získá ideální řešení pro výrobu prototypů, které tuto výrobu výrazně urychlí a zlevní, jelikož nebude nutné používat ve většině případů několik různých materiálů. Zároveň se bude zkoumat vliv vložení do pece u spojů trubek s plechy a vliv gravitace na pájený spoj. Další výhodou vyplývající z tohoto výzkumu budou podklady, které se budou moci dát zákazníkům jako pevné důkazy, proč se použil daný materiál na výrobu.



*obr. 1-2: Sídlo firmy Valeo v Žebráku[2]*

## 2 Výparníky

### 2.1 Motivace pro používání klimatizace

Klimatizace jsou v moderních automobilech současné doby standardní a nepostradatelnou výbavou vozu.

Prvním a zjevným důvodem je to, že se s jejich využitím dá v kabině vozidla vytvořit a udržet příjemná teplota.

Dalším důvodem, proč mít ve svém automobilu klimatizaci, je i hledisko bezpečnostní. Díky mnoha vědeckým studiím je známo, že řidič, který je vystaven teplotě 25°C a výš, ztrácí pozornost a tíhne k ospalosti. Dále také snižujeme použitím klimatizace zdravotní rizika, kterým by byli řidič a posádka vystaveni, pokud by byli nuceni jet se staženými okny (například jízda městem v horkém dni). Otevřenými okny se do vozidla snadno dostane prach, hluk a polévaté částice, které mohou zapříčinit některá onemocnění spojené s dýchací soustavou.

Na závěr je zde také komfortní hledisko. Díky tomu, že dnešní klimatizace mají protizápachové filtry, jde do kabiny vozu pouze čistý vzduch.

### 2.2 Popis výparníku

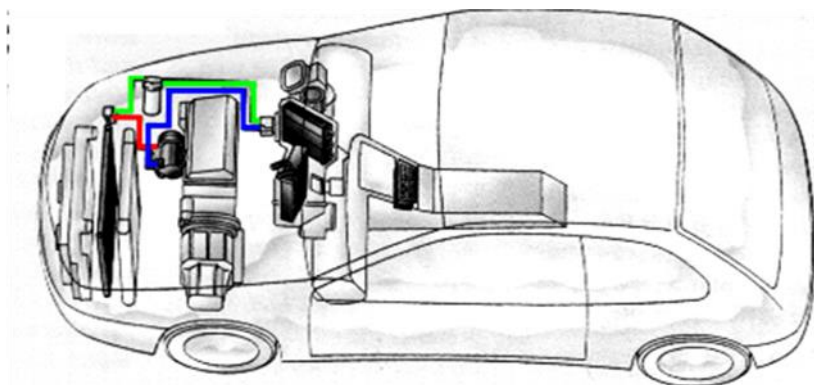
Výparník je zařízení, na něž jsou kladeny tyto požadavky:

- 1) Chladit vzduch
- 2) Odvlhčit vzduch
- 3) Umožnit odvod kondenzátu
- 4) Nezapáchat

Výparník je ve vozidle součástí systému topení, ventilace a klimatizace (HVAC jednotky), skrze který je do kabiny přiváděn vzduch. Vzduch procházející přes finy výparníku je proti vstupnímu stavu suchý a ochlazený. Díky ventilátoru klimatizace je poté vzduch rozváděn do kabiny.

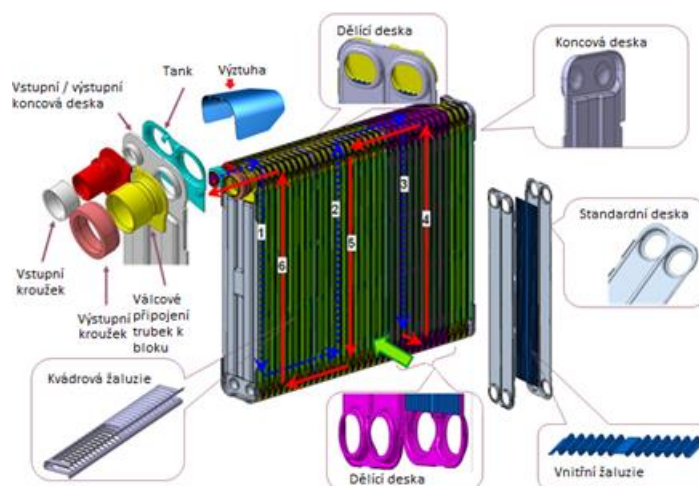
Splnění všech výše popsaných požadavků nestačí k bezproblémovému provozu, protože je třeba také dodržet požadavky na výkon výparníku. Bylo by příliš neefektivní, kdyby trvalo vychladit kabinu automobilu klimatizací např. 30 minut jízdy.

Výparník se skládá z jednotlivých částí, které jsou popsány na schématu níže (Obr. 2-2).



obr. 2 -1: Schéma automobilové klimatizace[3]

Důvodem je zajištění správné funkce a odolnosti výparníku. Dále je mnohem jednodušší konstruovat jednotlivé části a ty následně poskládat do velkého celku, než konstruovat výparník jako jedno těleso. Tímto způsobem lze poskládat různé velikosti výparníků v závislosti na požadovaných výkonech.



obr. 2-2: Součásti výparníku LUCIE 38 mm

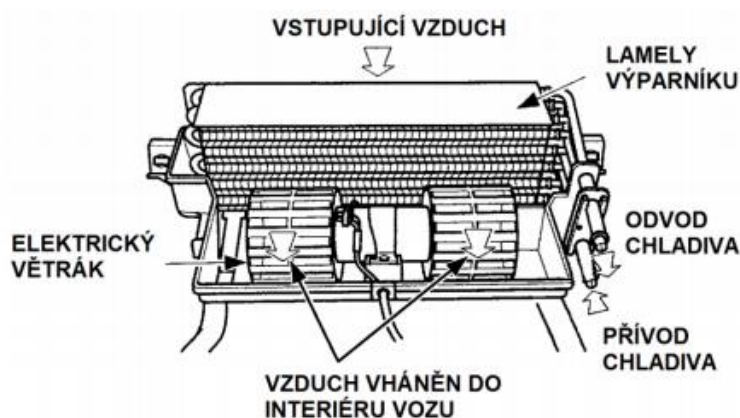
## 2.3 Princip funkce výparníku

Ve výparníku mění chladivo svoji fázi z tekuté na plynnou. Do výparníku je vstříknuto chladivo přes expanzní ventil, který je napojen před blokem výparníku. Dále se sníží tlak, který je uvnitř, a tím dojde ke změně fáze chladiva z kapalné na plynnou. Při této změně se odebírá teplo vzduchu, který proudí přes lamely výparníku. Díky ochlazení vzduchu dojde ke kondenzaci již obsažené vlhkosti na povrchu výparníku, která odtud dále odtéká ven z vozidla.

Aby nedošlo k přílišnému ochlazení výparníku a zabránilo se namrznání kondenzátu, je na výparníku umístěn termočlánkový senzor. Je nastaven tak, aby udržoval teplotu kondenzátu nad 2 °C až 3 °C. Dosahuje toho tím, že po ochlazení na minimální povolenou teplotu odstaví kompresor klimatizace. Protože v případě namrznutí by došlo ke snížení účinnosti klimatizace.

## 2.4 Historie pájených výparníků

V posledních dvaceti letech byly vyvinuty již čtyři generace. V průběhu let byla



obr. 2-3: Princip funkce výparníku[4]

snaha hlavně o zmenšení zástavbové velikosti výparníků při zachování stejných nebo vyšších výkonnostních vlastností. Dnes se vývoj dostal už na takovou úroveň, že další zmenšování, s ohledem na zachování výkonu a průtoku vzduchu, by nebylo finančně výhodné. Nebo bylo již dosaženo maximálních fyzikálních možností s přihlédnutím k možnostem dnešních materiálů a způsobu výroby. Proto se dnes rozměry výparníků zvětšují, podobně jako tomu bylo před několika lety u mobilních telefonů nebo dnes u spalovacích motorů automobilů. Důvodem je například větší důraz kladený na výkon než na zástavbové rozměry výparníku. To dokazuje dlouhodobě trvajícím trendem výroby automobilů s karoseriemi typů SUV nebo Crossover. U těchto karoserií není problém zakomponovat větší a výkonnější klimatizační systém. Výkonnější je potřeba z více důvodů. Jedním je u těchto karosářských variant například velká zasklená plocha, skrze kterou jde do automobilu velké množství světla, a tedy i tepla. Dalším je třeba komfort ovzduší v kabině vozidla: každý zákazník chce mít svůj vůz ochlazený na správnou teplotu co nejdříve.

## 2.4.1 Generace – DESIRE

První generace se dostala do výroby v roce 1999 a obsahovala dvě šířkové varianty bloků, a to šířku 75 mm a 60 mm. Teplotní homogenita se u této generace držela u hodnot pod 7 °C. Připojení do chladicího oběhu bylo možné buď z konce bloku nebo z boční strany. Rozhodnutí, zda se budou montovat vstupní a výstupní trubky z boku nebo z konce, bylo na požadavcích zákazníka s ohledem na zástavbové rozměry a složitosti montáže zástavby.



*obr. 2-4: Blok první generace DESIRE[3]*



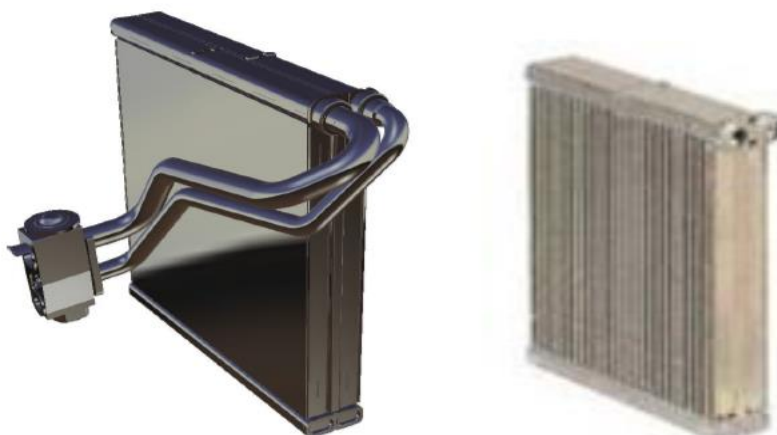
## 2.4.2 Generace – CLOE

Druhá generace s názvem CLOE byla uvedena do výroby v roce 2003. Tato generace přinesla největší velikostní redukci šířky bloku. Oproti první generaci měla tato šířka bloku 48 mm. Další změnou bylo to, že tato generace měla přívodní a odvodní trubky umístěny pouze na konci bloku vedle sebe. Hlavní výhodou tohoto bloku bylo to, že se povedlo zachovat stejný výkon při zmenšení šířky o více než 30 %. Dále se také podařilo zachovat stejnou teplotní homogenitu a v neposlední řadě snížit pokles tlaku vzduchu o 25 % a snížit hmotnost o 24 % proti větší variantě generace DESIRE.



*obr. 2-5: Blok druhé generace CLOE[3]*

## 2.4.3 Generace – KE – 8



*obr. 2-6: Blok třetí generace KE-8[3]*

Začátek výroby třetí generace s názvem KE-8 byl spuštěn v roce 2005. Šířka výparníku se snížila o 8 mm na konečných 40 mm. V této generaci šlo o pokus jiného přístupu ke skládání jednotlivých částí oproti předchozím dvěma generacím. A v neposlední řadě šlo také o jiný technologický design.



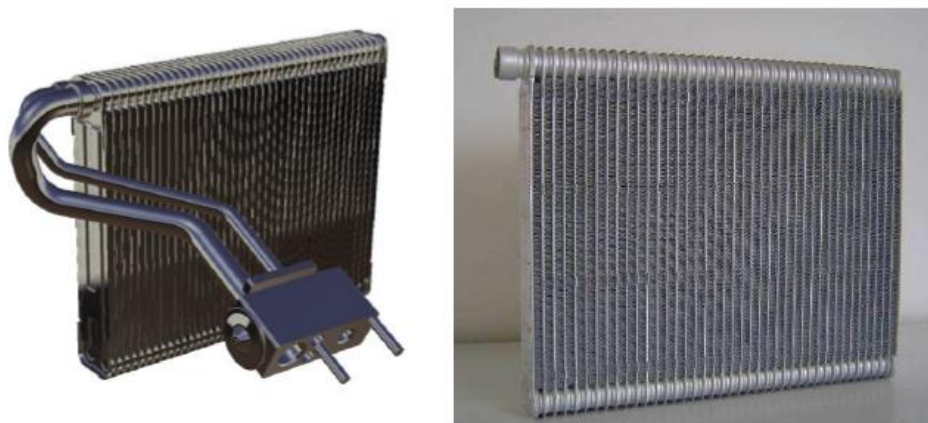
Hlavní rozdíl byl v konstrukci jednotlivých komponent. Hodnoty výkonu i hodnoty teplotní homogenity zůstaly stejné.

Dosáhlo se snížení hmotnosti o 15 % a snížení poklesu tlaku vzduchu o 13 % oproti generaci CLOE. Napojení trubek bylo na konci bloku, stejně jako u předchozí generace. Tento typ výparníku byl vyvinut v Japonsku, výroba probíhá v Thajsku, zatímco v Evropě se nevyrábí.

#### 2.4.4 Generace – LUCIE

Čtvrtá generace se jmenuje LUCIE a začala se vyrábět v roce 2011. Zkratka LUCIE znamená **L**ight **U**ltra **C**ooling **I**nnovative **E**vaporator. U této generace se snížila šířka bloku na 38 mm a dále se snížila tloušťka materiálu. Co se týče konstrukce komponent a skládání výparníku, blok LUCIE navazuje na druhou generaci CLOE. Změnou je oproti předchozím generacím jiné proudění chladiva skrz výparník a vstupní trubka má oproti výstupní trubce menší průměr. Také se změnila vnitřní finy, které jsou u tohoto modelu odvozeny od trubkového návrhu namísto jejich samostatného vložení. Výkon je o 6 % vyšší než u generace CLOE. I další námi sledované parametry jsou v porovnání s CLOE lepší. Teplotní homogenita je nižší než 5 °C.

Pokles tlaku vzduchu je 90 % poklesu u CLOE a hmotnost se snížila o 7 %. Tento typ je dnes hlavní náplní výroby a pro jednotlivé zákazníky se upravuje pouze tvar trubkového připojení.



obr. 2-7: Blok čtvrté generace LUCIE[3]

## 2.5 Chladiva do klimatizací

Nejen výparníky prochází vývojem, ale také chladiva, která se v nich používají. Ke změnám v chladivech dochází hlavně s ohledem k jejich projevům vůči životnímu prostředí. S tím je spojený případný únik do ovzduší například kvůli nehodě nebo poruše systému.

### 2.5.1 Historický přehled

V začátcích používání umělého chlazení byly většinou používány dva druhy chladiv. Používaly se oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) a amoniak ( $\text{NH}_3$ ). Ovšem obě dvě varianty byly problematické.

Amoniak je toxický a  $\text{CO}_2$  potřebuje extrémně vysoké pracovní tlaky (od 30–200 bar) pro použití v chladícím cyklu. Protože pracuje v nadkritickém cyklu, teplota, která je na výstupu z kompresoru, je extrémně vysoká a pohybuje se kolem 160 °C.

Když byl objeven Freon 12 (dichlor–difluor–metan), stal se okamžitě jasnou volbou jako chladící médium. Jedná se o extrémně stabilní, netoxickou kapalinu, která pro použití s kompresorem nepotřebuje žádné mazání a pracuje vždy s tlaky většími, než je tlak atmosférický. Tedy v případě úniku ze systému nebude unikat do okruhu nasátý okolní vzduch. Z toho vyplývá, že není při případném doplňování třeba zajišťovat v okolí vakuum. Když se stalo, že chladivo skutečně uniklo a následně vystoupalo k ozónové vrstvě, ultrafialové záření rozbilo molekulu freonu. To mělo za následek vypuštění aktivních chlorových radikálů, které způsobují ztenčování ozónové vrstvy.

Když se zjistilo, co vlastně Freon 12 způsobuje, bylo jeho používání celosvětově zakázáno. V podstatě byl nahrazen R134a (tetrafluor–ethan), který nemá chlorovou složku, avšak proti svému předchůdci není již tak stabilní. Na druhé straně ale nemá vliv na ztenčování ozónové vrstvy.

R134a byl relativně dlouhý čas bez větších problémů používán všemi automobilovými výrobci jako médium do klimatizačních systémů.

V nedávné době však mezinárodní vědecké týmy zjistily, že globální oteplování je způsobováno činností člověka. [7] Různé člověkem vytvořené látky jsou definované na základě Potenciálu globálního oteplování (GWP) s ohledem na oxid uhličitý ( $\text{GWP} = 1$ ).

U R134a byla zjištěna hodnota  $\text{GWP} = 1430$  a jeho použití bylo zakázáno po celé Evropě pro všechna nová auta.

Chemické podniky DuPont a Honeywell se spojily k vytvoření chladícího média, které splní požadavky na regulace od Evropské komise.

Název tohoto chladiva je R-1234yf a jeho GWP je roven 4, což představuje proti R134a značné zlepšení. Tlak v pracovních cyklech je velmi podobný jako u R-134a a výhodou je také to, že množství chladiva v chladícím okruhu je přibližně o 5 % nižší než u R-134a.

Největší výhodou chladiva R-1234yf je možnost využití všech klimatizačních komponent (tepelných výměníků, kompresorů, klimatizačních trubek atd.) s malými úpravami vyvinutými pro

chladiivo R-134a. To bylo možné proto, že R-134a a R-1234yf mají velmi blízké fyzikální i chemické vlastnosti.

Pro tuto variantu se rozhodli automobiloví výrobci, kteří tak mohli využít již vyvinutých komponent místo drahého vývoje nových součástí do klimatizačního systému.

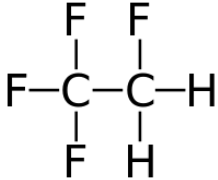
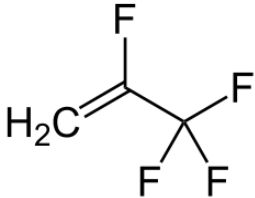
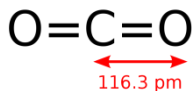
Problém však byl s klasifikací bezpečnosti. Chladiivo R-1234yf je klasifikováno jako "velmi hořlavé". Z tohoto důvodu proběhly mezi experty zajímavými se o chladiiva intenzivní diskuse. Jedna skupina prohlásila hořlavost R-1234yf jako vysoké riziko v případě nehody vozidla, protože by tak posádka vozidla mohla uhořet. Jde tedy o velmi negativní faktor pro bezpečnost a jeho použití v automobilech. Navzdory tomu nebylo během předepsaných testů toto chladiivo pro použití v automobilových klimatizacích označeno za nevhodné.

Přesto se dnes toto chladicí médium používá pro většinu nových automobilů. Tak jako tak je toto chladiivo "podezřelé" a je na něj pohlíženo s velkou ostražitostí hlavně německými výrobci automobilů, kteří společně se svými dodavateli vyvíjí velké úsilí pro získání náhrady.

## 2.5.2 Výhody použití CO<sub>2</sub> jako chladiva

Z důvodů popsaných výše vyplývá, že dnes dochází k návratu, lze říci „ke kořenům“, tedy že se vracíme k používání oxidu uhličitého jako chladiva. Potřeba vysokého tlaku a vysoká teplota kompresoru jsou dvě hlavní negativa, která byla dříve vyčítána CO<sub>2</sub>. Tyto vlastnosti se však ukázaly být ve výsledku výhodami.

### Porovnání jednotlivých chladiv:

Chladiva	R-134a	R-1234yf	R-744
Chemický vzorec			
Systematický název	1,1,1,2-tetrafluorethan	2,3,3,3-tetrafluorpropen	Oxid uhličitý
Sumární vzorec	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
Hmotnost	102 g/mol	112 g/mol	44 g/mol
Hodnota kritické teploty v [°C]	101 [°C]	95 [°C]	31 [°C]
Hořlavost	Nehořlavé	Lehce hořlavé	Nehořlavé
Potenciál globálního oteplování	1430	4	1

Tabulka 1: Tabulka používaných chladících médií

Díky potřebě velmi vysokého tlaku cyklu je v jeho průběhu hustota chladiva velká. To umožňuje zmenšení jednotlivých částí systému, jako jsou tepelné výměníky, rozvodné trubky atd. při zachování stejných požadavků na výkon kompresoru. Vysoká teplota na výstupu umožní okamžité odmrazení čelního skla automobilu. Další výhodou tohoto řešení je mnohem nižší cena chladicího média CO<sub>2</sub> proti obvyklým chladivům.

### 2.5.3 Potenciál globálního oteplování

Globální oteplování je jedním z největších problémů, kterým lidstvo v dnešní době čelí. Jde o zvyšování teploty na celé planetě, což způsobuje roztávání ledovců v polárních oblastech, zvyšování hladiny a teploty světových oceánů a s tím související vymírání mnoha živočišných druhů, například korálů. Za jednu z příčin těchto změn jsou označovány skleníkové plyny, které vytváří v atmosféře vrstvu, která vrací odražené teplo z povrchu zpět na zem nebo zadržuje teplo v atmosféře.

Potenciál globálního oteplování (Global warming potential – GWP) je relativní míra toho, kolik tepla zachycují skleníkové plyny v atmosféře. Porovnává objem tepla zachyceného určitým množstvím zkoumaného plynu vůči objemu tepla zachyceného podobným množstvím oxidu uhličitého. Tato hodnota je vypočítána za určitý časový interval, běžně se používá 20, 100 nebo 500 let. Potenciál je vyjádřen jako faktor oxidu uhličitého, který má potenciál globálního oteplování standardizován na hodnotu 1.

Potenciál globálního oteplování závisí na následujících faktorech:

- Pohlcování infračerveného záření jednotlivými druhy
- Spektrální pozice pohlcujících vlnových délek
- Životní cyklus v atmosféře pro jednotlivé druhy

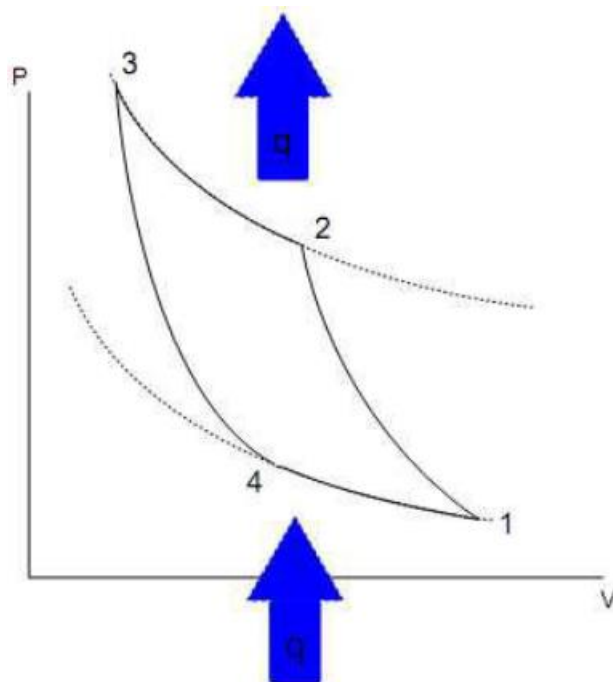
Tudíž vysoký GWP se vztahuje k velké pohltivosti infračerveného záření a dlouhému atmosférickému životnímu cyklu.

### 3 Chladicí oběh

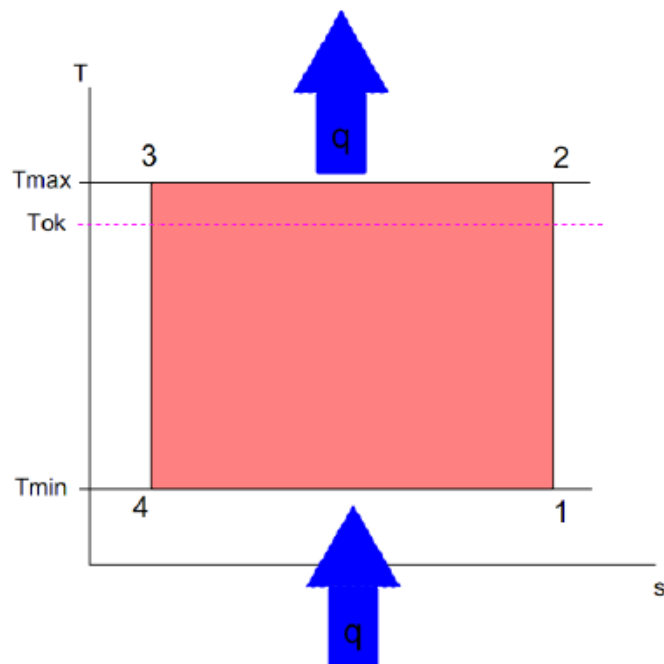
Potřeba člověka využívat chlazení je známa již od pravěku, kdy lidé využívali jeskyně také jako úkryt v horkých letních dnech. Už sofistikovanější pokusy ochlazování můžeme vidět ve starém Římě, kde stavitelé vedli kanály s vodou okolo budov nebo pod podlahami, čímž ochlazovali vnitřní prostory. V dnešní době už určitý způsob chlazení patří k našemu životu. Mít doma ledničku nebo mrazicí box je dnes již naprosto běžné. Je zajímavé, jak rychle jsme si na klimatizaci zvykli, když ještě v padesátých letech minulého století šlo o velmi luxusní věc pro pár vyvolených, kteří si ji mohli dovolit pořídit. Dnes jsou díky vývoji klimatizované kanceláře, automobily, ale i v domácnostech jsou klimatizační jednotky čím dál častějším jevem. V automobilech je dnes klimatizace dokonce standardní výbavou. V této části se zaměříme hlavně na klimatizační řešení, které nacházíme v automobilech.

Pro teoretický chladicí oběh můžeme použít obrácený oběh tepelného motoru, tedy oběh levoběžný. Chlazení jako takové probíhá ve výparníku, ve kterém dochází k varu chladiva, kdy odebírá od okolí velké množství tepla, odpovídající výparnému skupenskému teplu chladiva.

Největší rozdíl mezi oběhy chladicího a tepelného motoru je nutnost dodávat práci u chlazení a u tepelného motoru ji naopak odebírat. Práce se u chladicího oběhu přivádí proto, aby bylo možné zvýšit tlak chladiva. To, jaká bude teplota varu, je závislé na tlaku, který vznikne uvnitř výparníku. Tlak, který využíváme pro chladicí okruh, je vyšší než tlak atmosférický, což je z toho důvodu, aby nedošlo ke vniknutí vzduchu do chladiva. Samotný okruh je možné rozdělit na dvě větve, a to nízkotlakou a vysokotlakou. V nízkotlaké větvi se nachází tlak do 3 barů a ve vysokotlaké je možnost dosáhnout až 20 bar podle toho, jaký druh chladiva se použije. Do výparníku se chladivo pouští z kondenzátoru přes expanzní ventil v kapalno–plynné fázi. Funkce kondenzátoru je taková, že zajišťuje, aby chladivo přešlo plně do kapalné fáze. Do kompresoru může vstoupit pouze chladivo v čisté plynné fázi, což zajišťuje výparník, ve kterém dojde k finální přeměně z kapalno–plynné na plynnou fázi chladiva. To, aby přeměna proběhla tak, jak je požadováno, se zaručuje zaškrcením průtoku chladiva a odebráním tlakové energie. Princip chladicího oběhu si nejlépe předvedeme na příkladu Carnotova cyklu.



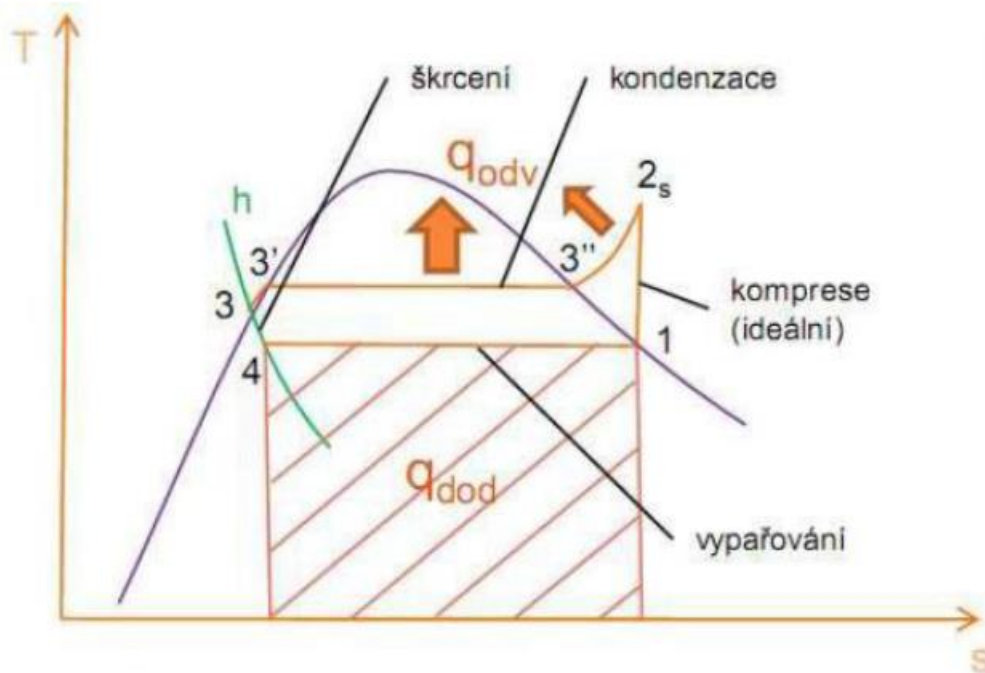
obr. 3-1: Obrácený Carnotův cyklus P-V diagram[5]



Obr. 3-2: Obrácený Carnotův cyklus T-S diagram[5]

### 3.1 Chladicí oběh s dvoufázovým médiem

V klimatizaci, kterou nacházíme v automobilu, se používá oběh Clausius-Rankinův za použití média, které má kapalnou i plynnou skupenství. Médium je při vstupu do kompresoru v ideálním případě adiabaticky stlačeno na tlak  $p_2$  (při přechodu z oblasti 1 do oblasti 2). Odtud jde médium v plynné fázi do kondenzátoru, kde změní svou fázi na kapalnou, přičemž předá do okolí přijaté teplo z chlazeného prostoru (při přechodu z oblasti 2 do oblasti 3). Aby byl zajištěn vyšší výkon chlazení, médium, které opouští kondenzátor, bývá lehce podchlazeno. Tím docílíme posunutí bodu 4 v diagramu p-v více doleva, což zvětší rozdíl entalpií  $h_1-h_4$ . Médium, které bylo podchlazeno, pokračuje zpět do výparníku, ztrácí tlakovou energii a má částečně kapalnou fázi (při přechodu z oblasti 3 do oblasti 4). Chladicí výkon na konci oběhu získáme z rozdílu entalpií, který vynásobíme chladivovým průtokem.



obr. 3-3: Clausius-Rankinův cyklus s dvoufázovým médiem[6]



## 4 Pájené spoje tepelných výměníků

V této části budou popsány výhody hliníkových výparníků oproti měděným, dále zde budou představeny typy konstrukcí výměníků. Také zde budou uvedeny výrobní metody a materiály. V posledních částech jsou popsány jednotlivé součásti výměníků a materiály, které se na ně používají.

### 4.1 Výhody hliníkových tepelných výměníků

Existují dva hlavní důvody, které vysvětlují, proč jsou hliníkové tepelné výměníky často využívané v automobilovém průmyslu: Velikost úspor při nahrazení drahého surového materiálu, kterým je měď, společně s levnějším surovým materiálem, kterým je hliník, a velikost úspor, která byla dosažena možností použití výkonnějších výrobků a více efektivních výrobních procesů. Hliník nabízí množství výhodných materiálových charakteristik pro výměníky:

- Velký potenciál pro vytvoření lehké konstrukce
- Vysoce automatizované a spolehlivé výrobní procesy (pájení)
- Velká tepelná vodivost
- Výborná odolnost proti korozi
- Dobrá tvářitelnost
- Dobrá teplotní odolnost a odolnost při testech tlakovými cykly
- Jednoduchá recyklovatelnost, tedy řešení šetrné k životnímu prostředí

	Hliník	Hliník	Hliník	Ocel	Nerezová ocel	Měď
	Slitina 1050A H14	Slitina 3003 H14	Slitina 6005A T5T6	E36 A52	Z7CN (18-09) 304	Válcovaná za tepla M20
Teplota nebo rozmezí teplot tání (°C)	645 / 658	640 / 655	605 / 655	1400 / 1530	1400 / 1450	1083
Objemová hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )	2700	2730	2710	7820	7900	8940
Koeficient teplotní roztažnosti (20 až 100°C) (10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup> )	23,5	23,2	23,5	13,5	17,5	17
Tepelná vodivost ve °C (W/(K.m))	229	155	193	40	15	391
Mez kluzu (MPa)	80	140	260	360	230	69
Mez pevnosti (MPa)	115	155	285	550	700	235
Prodloužení v %	6	8	12	20	50	45
Modul pružnosti (MPa)	69000	69000	69500	210000	200000	115000
Tvrдость dle Brinella (HB)	35	46	90	155		45

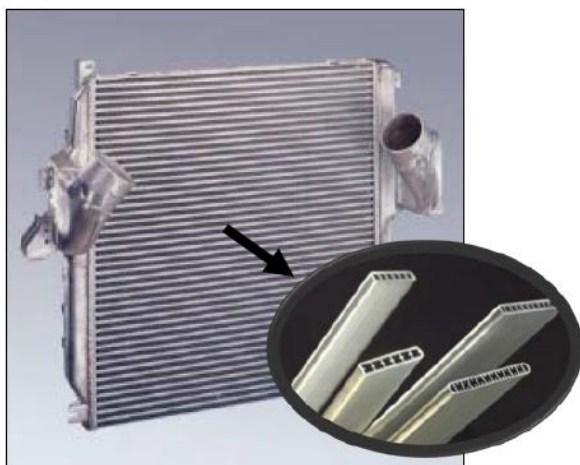
Tabulka 2: Porovnání materiálů[8]

## 4.2 Konstrukce hliníkových tepelných výměníků

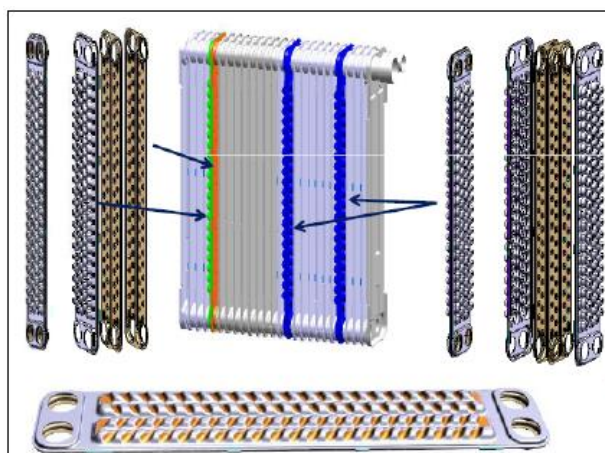
Ačkoli existuje mnoho konstrukčních koncepcí pro hliníkové výměníky, všechny lze rozřadit do jedné z hlavních kategorií:

- Trubka / fin
- Deska / fin
- Deska / tyč
- Tank vyrobený protlačováním / fin

Většina tepelných výměníků, které jsou využívány v dnešní automobilové výrobě, jsou založeny na konstrukci trubka / fin. [9]



obr. 4-1: Náporový chladič s konstrukcí typu trubka / fin (Denso). [8]

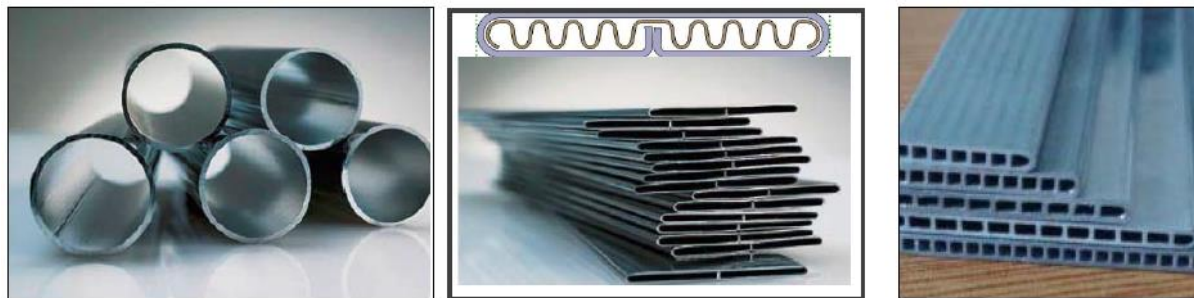


obr. 4-2: Výparník s konstrukcí deska / fin (Valeo). [8]

V praxi se využívají tři druhy trubek pro tepelné výměníky:

- Svařované trubky
- Skládávané trubky
- Protlačované trubky - mohou to být kulaté trubky (RT - round tubes) nebo trubky protlačované s více otvory (MPE - Multiport Extrusion).

Svařované kulaté trubky mohou být používány v mechanicky skládaných tepelných výparnících jako trubky, které jsou napojeny na tank výměníku a slouží k výměně tepla s okolním médiem, nebo jako přívodní a odvodní trubky média do výměníku. RT trubky mohou projít následnou výrobní operací tažením, kdy je dále redukována tloušťka stěny, čímž dochází k zpřesnění výsledné geometrie na geometrii požadovanou. MPE trubky jsou ploché trubky s více kanálky, které se táhnou skrze celou délku trubky. Plochá geometrie MPE trubek vede k menšímu aerodynamickému odporu oproti kulatým trubkám. Další výhodou plochých trubek oproti kulatým trubkám je větší koeficient přestupu tepla z důvodu lepšího utváření teplotní mezní vrstvy. Další faktor, který zlepšuje tepelný výkon plochých trubek, je jejich větší teplosměnná plocha oproti trubkám kulatým. [9]



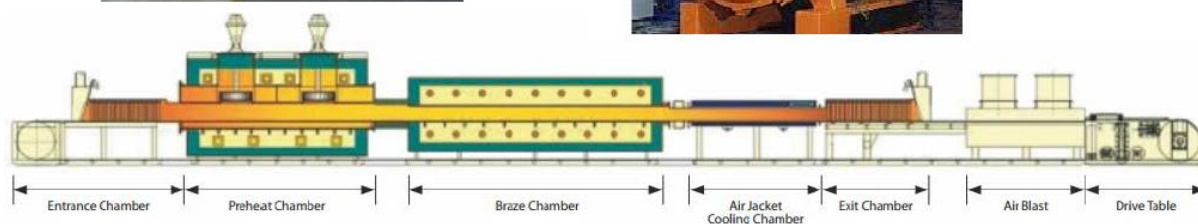
obr. 40-3: Druhy trubek využívané v tepelných výměnících

### 4.3 Výroba pájených, hliníkových výměníků

Pájené spoje mezi trubkou a finem mají pozitivní dopad na několik výkonnostních parametrů. Nejdůležitějším parametrem je malý tepelný odpor mezi finem a trubkou z důvodu neexistence vzduchových kapes (na rozdíl od mechanických výměníků).

Nejdůležitější je snížení přechodového odporu mezi trubkou a žaluzií, která vede k významně zvýšené teplotní vodivosti. Jiné procesy pájení, které se komerčně používají k výrobě hliníkových tepelných výměníků, jsou:

- Pájení při kontrolovaných atmosférických podmínkách (CAB)
- Vakuové pájení
- Pájení v solné lázni
- Neitzův proces
- Ni-ho pájení



obr. 4-4: CAB pec spodní a levý obrázek / Vakuová pec - pravý obrázek. [11]

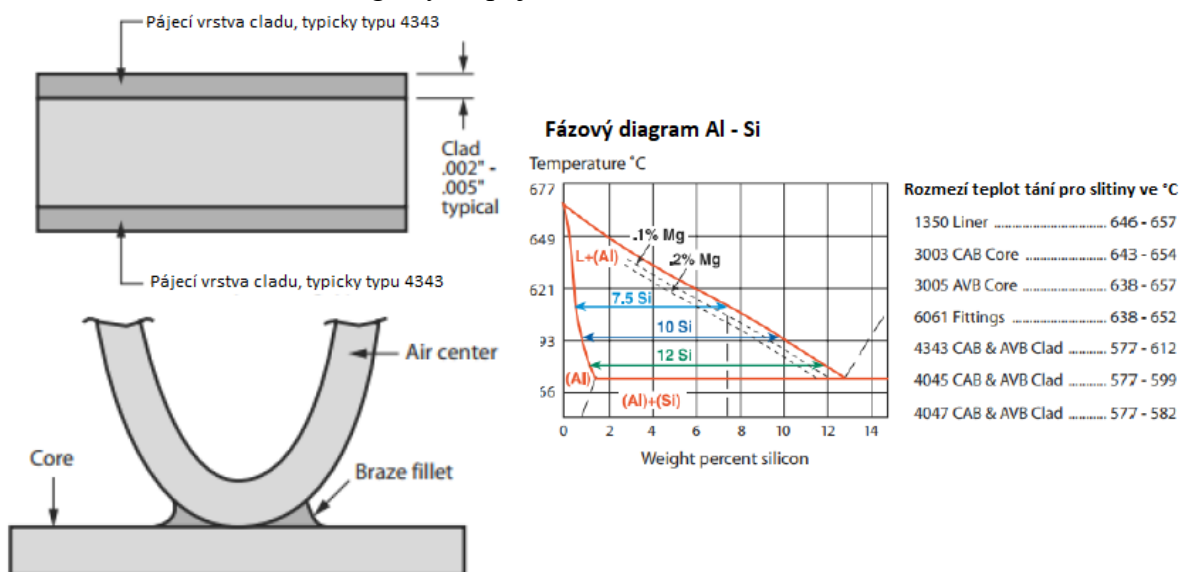
Principem procesu pájení v ochranné atmosféře (CAB - Control atmosphere brazing) je zahřátí výrobku na pájecí teplotu, která je udržována po určitou, předem danou, dobu (5-10 min). Tento proces probíhá v průmyslové pájecí peci, kde je přítomnost kyslíku limitována ochrannou atmosférou, kterou bývá dusík. Během pájení v peci se pájka, slitina Al-Si, ohřeje do teploty liquidu a dále dochází k jejímu zatečení do spojovaných součástí.

Mechanismus tohoto spojení funguje na principu difuze pájky a spojovaných součástí. Pájený spoj je ukázán na obrázku 4-5. Jako pájka je používána slitina

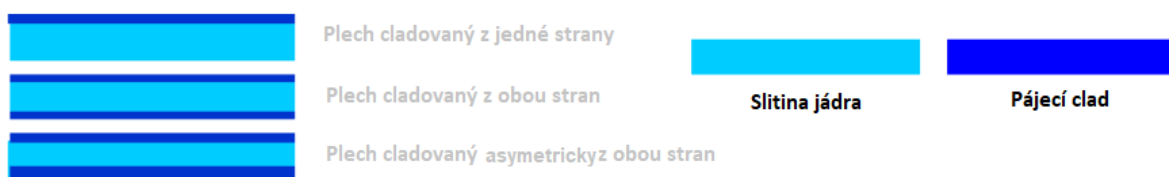
Al-Si, která má hodnotu bodu tání o 30 - 60 °C nižší, než je teplota tání slitiny jádra (hliníku řady 3xxx nebo 6xxx). Existuje několik způsobů, jak nanést pájku na spojovací materiál. Nejčastějším způsobem je vícevrstvý materiál, kdy slitina Al-Si je naválcována na slitinu jádra - po několika krocích válcování a homogenizačního žihání. [11]

Diagram na obrázku 4-5 ukazuje fázový diagram slitiny Al-Si, který je referencí vůči různým slitinám používaným pro CAB pájení s teplotou tekuté fáze pro každou z nich.

Výroba pájených výměníků tímto procesem je již zaběhnuta v automobilovém průmyslu. Vysoký stupeň automatizace montáže a procesu pájení - CAB, vhodný pro vysoké objemy výroby, umožňuje jak vysoký hmotný tok, tak výbornou kvalitu vedoucí k tepelným výměníkům obsahujícím spoje vytvořené 100% metalurgickým spojením.



obr. 4-5: Funkce cladu



obr. 4-6: Rozložení Cladu na pájecím plechu

Výrobci hliníku, pájecího tavidla (fluxu) a pecí spolu aktivně pracují na vylepšení a dalším vývoji pájených procesů za účelem snížení nákladů a snížení dopadu na životní prostředí. Pro trubky i finy existuje široké portfolio slitin vhodných jak pro tepelné vytvrzování, tak i tepelně nezušlechtilných. Hliníkové materiály vhodné pro pájecí procesy (cívky, pláty a trubky) mohou být dodávány v mnoha kombinacích slitin, šířek cladu, síly plátů, a šířek, přesně podle přání zákazníka.

Hliníkové slitiny jsou dnes již běžně používané materiály na výrobu tepelných výměníků pro automobily. Nabízejí vlastnosti, které mohou být jednoduše využitelné ve velkém množství komponentů, jako jsou:

- Vysoká tepelná vodivost
- Nízká hustota

- Dostatečná síla (také při zvýšených teplotách)
- Dobrá tvarovatelnost
- Výborná odolnost proti korozi

Správný výběr hliníkových slitin a výrobních forem nabízí možnosti vývoje a výroby různých druhů tepelných výměníků používaných v moderních automobilech a schopnost reagovat na stále stoupající nároky trhu ohledně zlepšeného výkonu přenosu tepla, ale také snížení hmotnosti, rozměrů a ceny.

Pro tepelné výměníky různých druhů, válcovaných, ale také vytlačovaných hliníkových výrobků jsou používány:

- ploché válcované materiály, např.:
  - necladované žaluzie pro chladiče, náporové ochlazovače vzduchu, ohřívače, atd...
  - cladované žaluzie pro kondenzátory
  - cladované hlavové desky a stranové desky pro různé druhy tepelných výměníků
  - cladovaný proužek pro svařované a skládané trubky pro chladiče, náporové ochlazovače vzduchu, ohřívače, atd...
  - cladované desky pro výparníky a chladiče oleje
- vytlačovaný materiál, např.:
  - protlačované trubky pro výparníky, chladiče, kondenzátory, atd...
  - protlačované a tažené trubky pro chladiče, topná jádra, výparníky a kondenzátory
  - vícevstupové protlačované trubky (MPE) pro výparníky, kondenzátory, náporové chladiče vzduchu, atd...
  - protlačované tvary [9]

#### 4.4 Materiály hliníkových, pájených, tepelných výměníků

Specifické vlastnosti materiálů hliníkových výměníků tepla se liší v závislosti na formě výrobku a předpokládané aplikaci. V důsledku toho je pro tepelné výměníky používáno několik hliníkových slitin, které byly vyvinuty pro optimální výkon v průběhu výroby. Záleží především na použité metodě pájení: pájení ve vakuové peci nebo pájení při kontrolované atmosféře využívající fluxu s hlinitofluorátem draselným. Z toho vyplývá i výborná odolnost proti korozi.

Tepelně neupravovatelné – NHT (non heat treatable) hlavně Al třídy 3000 - systém Al-Mn a tepelně upravovatelné - HT (heat treatable) hlavně Al třídy 6000 - systém Al-Mg-Si. Hliníkové slitiny mohou být použity pro různé komponenty tepelných výměníků. U čistého hliníku a NHT slitin se vyšší pevnosti dosahuje výlučně válcováním za studena. Procesem pájení nicméně dochází k vyžhání materiálu, jeho rekrystalizaci, odstranění nahromaděných dislokací. To vede k následnému odpevnění materiálu.

HT slitiny jsou také vytvrzené tvářením za studena, ale navíc nabízejí možnost precipitačního vytvrzování.

Pájecí procesy probíhají při přibližně 600 °C a jsou ideální na rozpuštění legujících prvků. Následující rychlé ochlazení zajistí přítomnost těchto prvků v přesyceném roztoku.

Precipitační vytvrzování, tj. nukleace a růst jemných precipitátů v HT slitinách, vede ke zvýšení pevnosti materiálu. K precipitačnímu vytvrzování dochází při pokojové teplotě (*proces přírodního stárnutí*), ale i při stárnutí v teplotním

rozmezí 150-200 °C (umělé stárnutí). Výše zmíněné procesy probíhají jak v kroku samostatného tepelného upravování, tak okamžitě po pájení - kontrolovaným rychlým ochlazením a udržováním pájených součástí v kritickém teplotním rozmezí po určitou danou dobu.[10]

#### 4.4.1 Finy

Finy vyžadují vysokou tepelnou vodivost, velký poměr síly k hmotnosti a dobrou odolnost proti korozi. Nejdůležitější je také schopnost hliníkových slitin být tvarován do komplexních geometrií používaných při výrobě finů. U mechanicky spojovaných tepelných výměníků je vysoká tvarovatelnost nezbytná pro bezproblémovou výrobu límčových finů. Z důvodu malé šířky finů (50-100 μm) dochází často při pájení k takzvanému prověšování. Prověšování je nazýván proces, který se objevuje při pájení (rekrytalizace materiálu, deformace finu) a který může vést až k rozpadu sestavy tepelného výměníku. U pájených tepelných výměníků jsou nejčastěji pro finy využívány materiály zakládající se na slitině EN AW-3003, ale většinou v lehce upravené podobě použité pro správnou výkonnost. Malé legury Cu nebo Mg (pokud je dovoleno použitou pájecí technikou) jsou využívány ke zvýšení pevnosti materiálu. Další varianty slitin obsahují vyšší množství Mn a občas také Si, aby se zajistila vyšší pevnost po pájení a dobrá odolnost proti prověšování při pájení. Tyto slitiny podporují vytváření velkých zrn při pájení, což je výhodné proti prověšování, a brání pronikání pájecího kovu do jádra. Také málo legované, teplotně upravovatelné slitiny systému Al-Mg-Si (třída slitin 6xxx) jsou občas používány (např. EN AW-6060 nebo EN AW-6063).

Dále také může být slitina na finy upravena pro katodickou ochranu trubek nebo slitin na headery proti korozi přidáním zinku v různých množstvích (až do 2.5 % Zn). Objem možných materiálů na finy je dále navýšen cladovanými variantami finů, kde je použité cladové složení do složení jádrové slitiny, a to jak pro vakuové pájení, tak pro pájení v kontrolované atmosféře s fluxem nebo bez fluxu.[9]

V průběhu let dosáhl postupný vývoj slitin a optimalizace výrobního procesu významné snížení potřebného materiálu pro hliníkové tepelné výměníky, čímž umožnil značné snížení hmotnosti a ceny výrobku.

#### 4.4.2 Válcovaný materiál s cladem i bez cladu pro headry a desky

Slitiny (jádrové slitiny pro cladované varianty) používané pro válcované pásy a pláty pro headry, boční podpěry, trubky, atd. mají v podstatě totožné složení jako materiály zmíněné výše pro finy (s výjimkou pro varianty obsahující Zn). Pro použití při pájení je jádro cladované s Al-Si slitinovými vrstvami, které působí jako zdroj výplňového kovu během pájecího procesu. Šířka pájecí cladované vrstvy je běžně mezi 5 - 20 % z tloušťky plechu pro varianty cladované pouze z jedné strany a 5 - 15 % pro varianty cladované pro oboustranné varianty. Typické cladované slitiny na použití pro pájení v peci s kontrolovanou atmosférou jsou EN AW-4343 a EN AW-4045, pro pájení ve vakuu jsou to potom EN AW-4004, EN AW-4045 a EN AW-4047.



Existují však mnohé další modifikace těchto základních složení, které se v praxi používají.[9]

Hliníkový plech používaný pro pájení je speciálně vyvíjený materiál složený z vícevrstevných kompozitních materiálů různé složitosti. Podle požadavků mohou být tyto materiály složeny z 2 - 5 vrstev. Každá z vrstev má určitý úkol během výrobního procesu nebo je používána ke splnění funkce tepelného výměníku v provozu. Například vrstva jádrové slitiny třídy 3xxx pro pevnost po pájení může být cladována vrstvou modifikované slitiny 3xxx pro ochranu před korozi a vrstva slitiny 4xxx využita k tomu, aby dodala výplňový materiál potřebný při pájecím procesu. Pro pájení v kontrolované atmosféře (CAB) mohou být nutné ještě komplikovanější varianty. Přídavkem Mg významně vylepší mechanické vlastnosti hliníkových slitin. Bohužel hořčík reaguje s mnohými z běžně komerčně používaných fluxů (materiál, který vylepšuje kvalitu pájení). Nehledě na to, více cladových vrstev může stále využít silnější hliníkové slitiny s příměsí Mg pro využití při pájení v kontrolované atmosféře. Prostřední cladování bez Mg funguje jako hráz pro difuzi Mg ze silnější jádrové slitiny s legurou Mg, a dokáže tedy snížit nebo vyloučit jakékoliv poškození fluxu. Cladované hliníkové trubky využívané při pájení, upravené pro různé pájecí procesy, jsou vyráběny na válcovacích stolicích z plochých srolovaných pásů v plochých oválných, čtyřhranných a kulatých profilech podélným svařováním (většinou se používá proces vysoko-frekvenčního svařování). Většinou se používá pouze kompozit o 2 vrstvách sestávající z jádrové slitiny (typicky EN AW-3003 nebo varianty této slitiny) a pájecí vrstvy na vnějším povrchu. Pokud je to nutné, může být jádrová slitina pokryta na druhé (vnitřní) straně pro zlepšení korozivzdornosti, např. s EN AW-1145 nebo EN AW-7072.[9]

### 4.4.3 Protlačované trubky

Protlačované trubky se nabízí v různých tvarech, velikostech a materiálech. Na rozdíl od jednoduchých protlačovaných trubek zahrnují trubky tepelných výměníků zejména kulaté nebo oválné přesně protahované trubky, jakož i trubky s více porty (MPE). I když protlačované hliníkové trubky nemají stejné výkonnostní charakteristiky jako přesné tažené trubky, představují cenově výhodnější alternativu při méně náročných použitích.

Kulaté trubky mají často hladké stěny, ale jejich výkon může být zvýšen s axiálními, rovnými nebo spirálovými mikro-finy na ploše vnitřního průměru pro zlepšení přenosu tepla na straně chladiva zvýšením plochy. V případě přesně protahovaných trubek zajišťuje kalibrační proces vyšší kvalitu vnějšího povrchu, ale také přesné geometrické tolerance. Dále přesně protahované trubky nabízí nejvyšší kvalitu a výborné vlastnosti pro zpracování při operacích jako je ohýbání, formování, protahování atd. Typicky využívané jsou hliníkové slitiny jako EN AW-1050, EN AW-3003, EN AW-5049 a EN AW-6101 a modifikace těchto složení jsou používány jak pro protlačované trubky, tak pro přesné tažené trubky pro tepelné výměníky.

Dále se využívají tzv. Long life slitiny, které mají vysokou odolnost proti korozi. Kulaté trubky se dají nalézt jako headerové trubky v automobilových tepelných výměnících, stejně jako kondenzátory a kapalinové trubky například v klimatizačních systémech.

MPE trubky jsou vyráběny tak, aby splnily specifické požadavky s ohledem k slitině, vnějším rozměrům, šířky stěny a sítě, hydraulickému průměru a dalším vlastnostem. Se svou velkou vnitřní plochou MPE profily (nebo trubky s mikro-kanálky) zajistí více efektivní přenos tepla a tím pádem jsou ideální pro použití ve vysoce efektivních tepelných výměnících. Materiál trubek musí mít správnou pevnost z důvodu odolnosti proti vysokým tlakům a únavě materiálu spolu s dobrou korozivzdorností na straně vzduchu i vody. Tím, jak se používají stále náročnější návrhy trubek, formovatelnost trubek získává mnohem vyšší důležitost. Proto jsou MPE trubky většinou vyráběny ze slitin EN AW-1050, EN AW-3003 a modifikací těchto slitin.[9]



## 5 Příprava materiálů pro experimenty

Výroba prototypových dílů výparníků probíhá ručním skládáním za pomoci jednoduchých manuálních přípravků, kde většina jednotlivých součástí výparníku je připravována v prototypové dílně, a je zde vyšší pravděpodobnost možných nepřesností a výkyvů mezi jednotlivými součástmi výparníku. Kdežto sériová výroba je polo-automatizovaný proces, kde se lidské zdroje využívají jen k přesunu od jednoho stroje k druhému, případně k nasazení dílů do stroje.

Materiál plechů pro experimenty byl brán z cívek, které se používají pro sériovou výrobu, pokud to bylo možné. V případě desek z materiálu Al 6063 bylo potřeba si nechat vyrobít vzorky o daných rozměrech od specializované firmy, která pro Valeo Žebrák vytváří prototypové díly. Dále také bylo potřeba poptat a objednat plechy s cladovou vrstvou typu 4045, protože ty také nebyly ve firmě skladem.

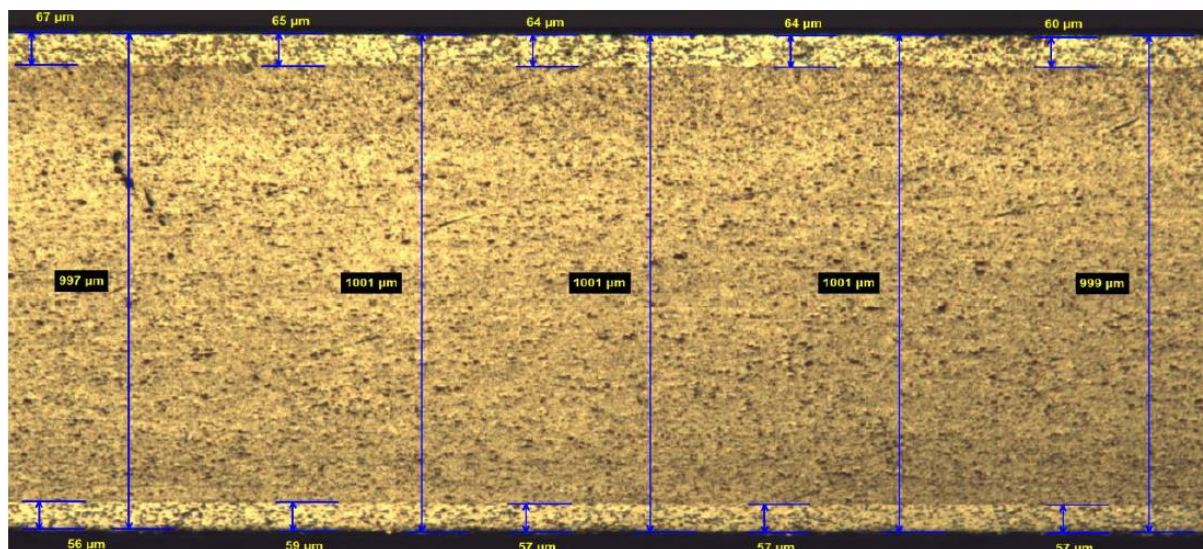
Byly zvolené oboustranně cladované plechy s poměrem cladu 5 %, 7,5 % a 10 % pro clad 4343 a 10 % pro clad 4045. Také jednostranně cladovaný plech byl použit, a to 5% s třídou cladu 4343.

### 5.1 Analýza šířky cladu na vzorcích

Pro oboustranně cladované plechy s cladem třídy 4343 byla pomocí metalografické analýzy změřena skutečná šířka cladu v materiálu. Měření probíhalo v materiálové laboratoři v závodě Valea v Žebráku. Leštění probíhalo na leštičce Buehler Phoenix 4000. Samotná analýza poté probíhala na optickém mikroskopu Nikon Epiphot 200.

#### 5.1.1 Plech s 5% šířkou cladové vrstvy

Jako první byl analyzován oboustranně cladovaný plech, který měl mít 5% šířku cladu. Samotný plech měl šířku 1 mm. Skutečná šířka cladu se spočítá po odečtení ze vzorku a vypočtením poměru v procentech, přičemž u oboustranně cladovaného plechu se říká, že je např. 5%, pokud je klad v šíři 5 % na obou stranách plechu.



obr. 5-1: Rozložení 5% cladu na plechu

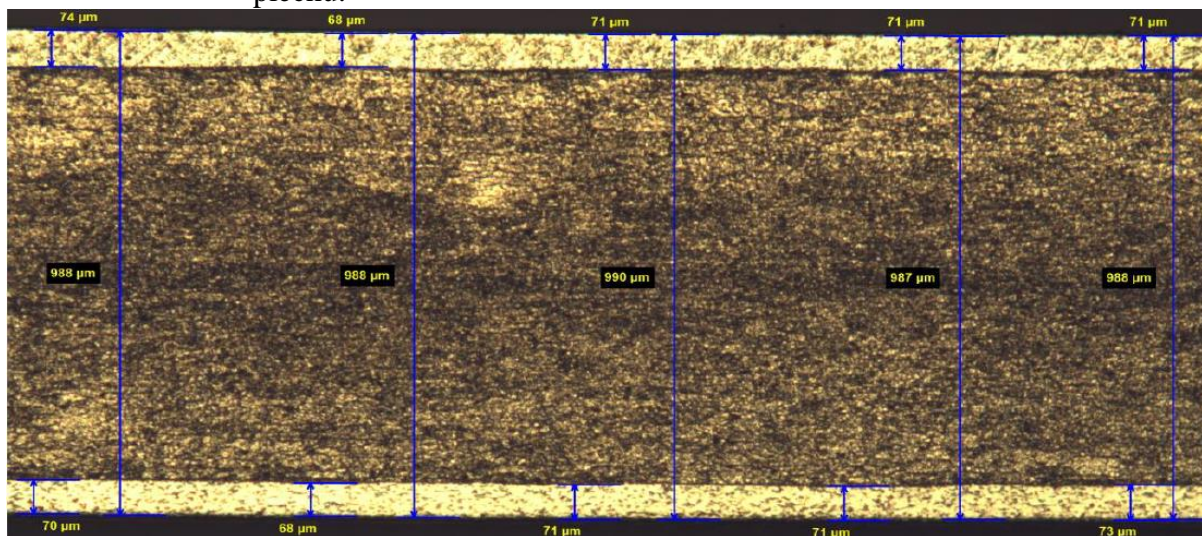
Jak je vidět na obrázku 5-1, šířka cladu se drží rovnoměrně napříč celým vzorkem. Na tomto obrázku lze také jasně vidět rozmezí mezi základním materiálem (tmavší barva) a cladem (světlejší barva). Hodnoty šířky cladu jsou vypsány v tabulce 3. Po zprůměrování odečtených hodnot vychází šířka cladu v horní části 6,4 % a ve spodní části 5,7 %. To je o dost více, než je nominální hodnota uvedená v materiálovém listu.

Výsledky:	Hodnoty ( $\mu\text{m}$ )					Průměr
Vrchní vrstva cladu	67	65	64	64	60	64 $\mu\text{m}$ (6,4%)
Síla materiálu	997	1001	1001	1001	999	999,8 $\mu\text{m}$
Spodní vrstva cladu	56	59	57	57	57	57,2 $\mu\text{m}$ (5,7%)

Tabulka 3: Hodnoty rozložení 5% cladu na plechu

### 5.1.2 Plech s 7,5% šířkou cladové vrstvy

Druhým změřeným byl plech s označením Al 3916 2F – 7,5 %. Tento plech měl také šířku 1 mm a měření probíhalo stejně jako u prvního plechu.



obr. 5-2: Rozložení 7,5% cladu na plechu

Hodnoty šířky cladu pro tento typ plechu jsou v tabulce 4. Po zprůměrování odečtených hodnot vychází šířka cladu v horní části 7,2 % a ve spodní části 7,1 %. To je méně, než je nominální hodnota uvedená v materiálovém listu. Je proto možné, že výsledky s plechem 5% a 7,5% budou velmi podobné, protože mají skoro stejně velkou vrstvu cladu.

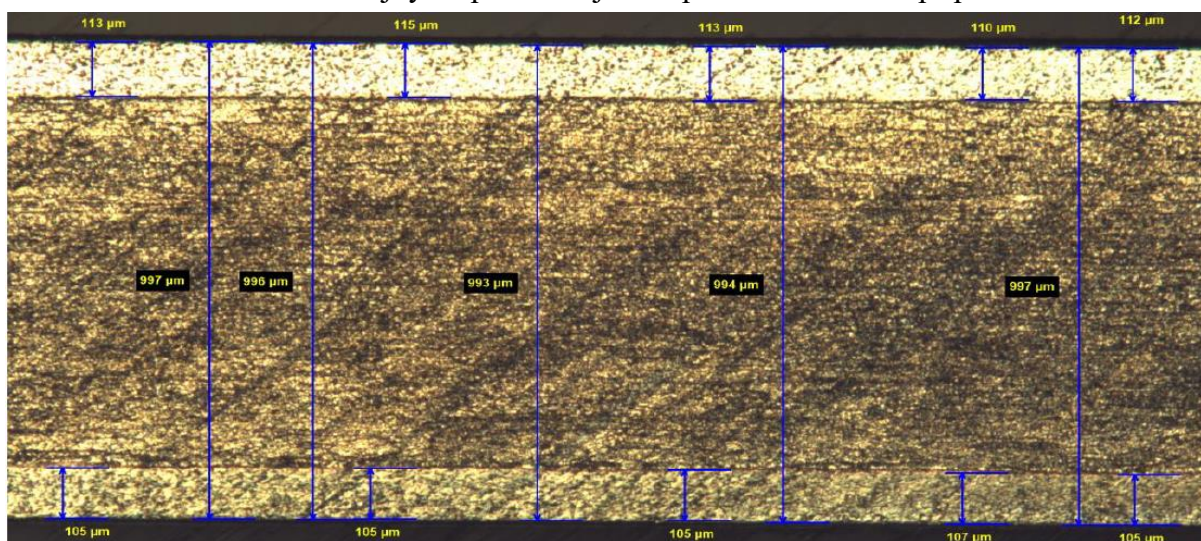


Výsledky:	Hodnoty (μm)					Průměr
Vrchní vrstva cladu	74	68	71	71	71	71 μm (7,2%)
Síla materiálu	988	988	990	987	988	988,2 μm
Spodní vrstva cladu	70	68	71	71	73	70,6 μm (7,1%)

Tabulka 4: Hodnoty rozložení 7,5% cladu na plechu

### 5.1.3 Plech s 11% šířkou cladové vrstvy

Jako poslední byl změřen plech s 11% šířkou cladové vrstvy. I zde probíhalo měření stejným způsobem jako u předchozích dvou případů.



obr. 5-3: Rozložení 11% cladu na plechu

Změřené hodnoty se nalézají v tabulce 5. Po zprůměrování odečtených hodnot vyšla šířka cladu v horní části 11,3 % a ve spodní části 10,5 %. To jsou hodnoty už výrazně odlišné od předchozích dvou měření, co se cladové vrstvy týče, a proto lze očekávat i jiné výsledky.

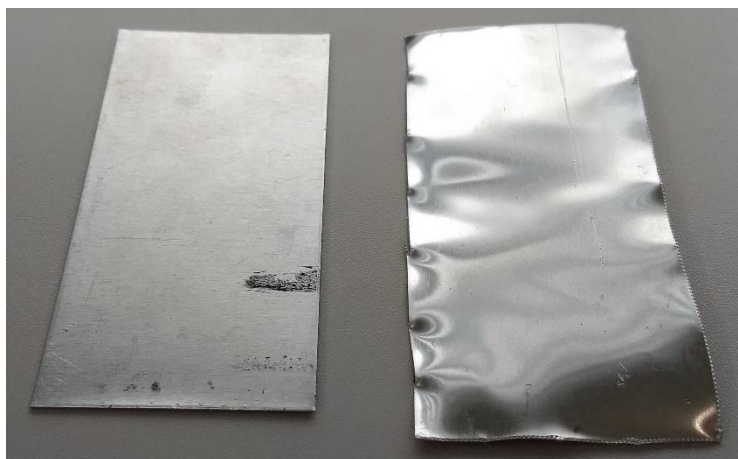
Výsledky:	Hodnoty (μm)					Průměr
Vrchní vrstva cladu	113	115	113	110	112	112,6 μm (11,3%)
Síla materiálu	997	996	993	994	997	995,4 μm
Spodní vrstva cladu	105	105	105	107	105	105,4 μm (10,5%)

Tabulka 5: Hodnoty rozložení 11% cladu na plechu

## 5.2 Příprava plechů a trubek na testy

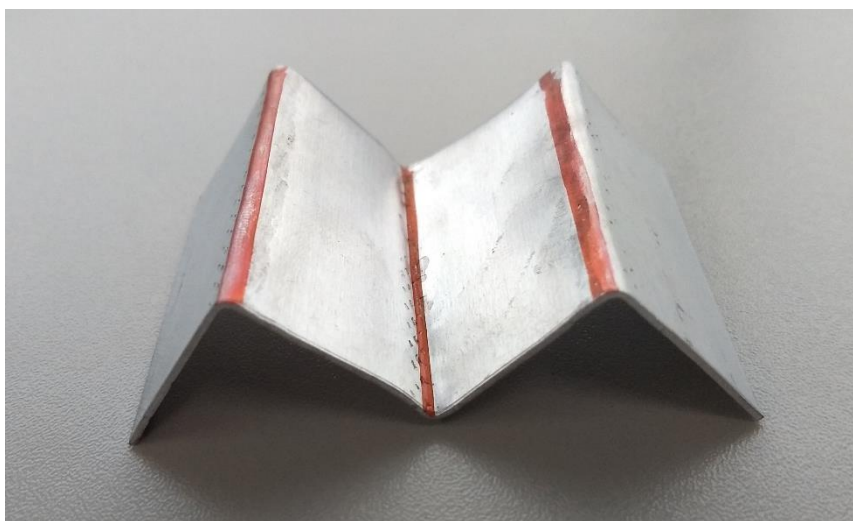
Protože byly cívky a pláty plechů, ze kterých se vzorky braly, různé délky i šířky, byly zvoleny rozměry jednoho vzorku (Šířka-Délka-Výška) 50-100-1 mm pro cladované plechy a 50-100-1,5 mm pro necladované plechy. Aby se zjednodušila příprava vzorků, byla použita různá výška u cladovaných a necladovaných plechů, protože v této síle materiálu jsou do firmy cívky dodávány.

Jednotlivé pláty plechů byly rozstříhány dvěma způsoby. První způsob byl nůžkami na plech a druhý způsob byl pákovými nůžkami, to bylo z důvodu zkrácení doby přípravy. Část vzorků byla nastříhána ve firmě a část v domácí dílně. Proto jsou také na vzorcích patrné rozdíly mezi okraji materiálu u některých vzorků.



obr. 5-4: Vlevo plech připravený v prototypové dílně. Vpravo plech připravený doma v dílně.

Poté, co byly plechy nastříhány na požadované rozměry, byly cladované plechy zohýbány do tvaru „M“. Toho bylo docíleno rozměřením jednotlivých plechů na tři místa ohybu, abychom dosáhli požadovaného „M“ tvaru. Každý úsek měl délku 25 mm. Byly vyznačeny 3 místa ohybu. Poté byly upnuty do svěráku v jednotlivých místech ohybu a postupně zohýbány do požadovaného tvaru.



obr. 5-5: Zohýbaný cladovaný plech do tvaru „M“.

Příprava trubek probíhala v prototypové dílně, odkud byly vzaty i dlouhé trubky, které byly pro potřeby experimentů zkráceny na stojanové pile na délku 50 mm.

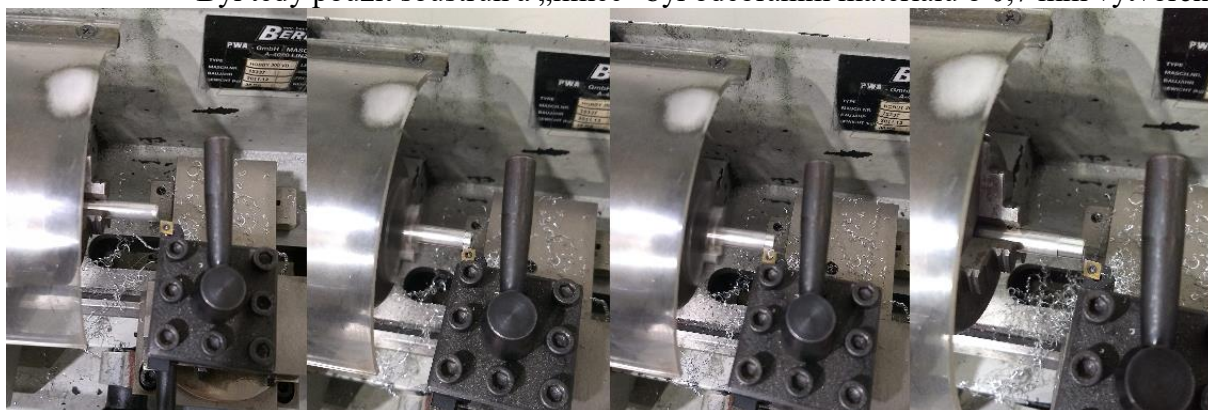


Aby se vyzkoušely možnosti zapájení s „límecem“ a bez něho, byly pro Al 3003 vzaty trubky, kde již byl „límec“ vytvořen.



*obr. 5-6: Trubka Al 3003, ze kterých byly připravované vzorky. Na pravém konci se nachází „límec“.*

S trubkami třídy Al 6063 to bylo poněkud složitější, protože se v prototypové dílně momentálně nepoužívají varianty trubek s „límecem“, bylo třeba si ho improvizovaně vytvořit pro potřeby následného porovnání variant vůči Al 3003. Byl tedy použit soustruh a „límec“ byl odebráním materiálu o 0,7 mm vytvořen.



*obr. 5-7: Vytváření improvizovaného „límce“ soustružením na trubce Al 6063.*

Na obrázku 5-7 je vidět proces soustružení pro vytvoření „límce“ na trubkách pro vzorky. Na obrázku 5-8 už je hotový, připravený vzorek trubky na testy.



*obr. 5-8: Hotový vzorek Al 6063 připravený na testy.*

Dalším krokem bylo vyvrtání potřebných otvorů do plechů bez cladové vrstvy (Al 3003, Al 6063) a Al 3003 1F s cladovou vrstvou, pro testy s trubkami.

Vzhledem k rozměrům trubek, které se lišily, byly použity různé velikosti děr pro trubky Al 3003 i Al 6063. Trubky Al 3003 měly běžný průměr 9,52 mm a v místě „límce“ měly průměr 11,8 mm. Pro zachování kapilární mezery 0,2 mm, a tedy zajištění zapájení, byly zvoleny přesné vrtáky s průměry 9,8 mm pro užší a 12 mm pro širší průměr. Pro trubky Al 6063, které měly průměry 9,4 mm a 8 mm, byly zvoleny rozměry vrtáků 9,6 mm a 8,2 mm.

Vrtání probíhalo pomocí ruční vrtačky uchycené ve stojanu a plechu vždy uchyceném pevně ve svěráku, a to pro dosažení co nejvyšší možné přesnosti vrtání. Vrtání bylo prováděno v domácí dílně.



*obr. 5-9: Necladovaný základový plech Al 6063 s vyvrtanými otvory.*

Z plechů s cladovou vrstvou se testy dělaly na oboustranných 5%, 7,5% a 10%, tyto měly jako základovou slitinu Al 3003 a výška materiálu byla 1 mm. Dále byl používán jednostranně cladovaný plech s 5% šířkou vrstvy cladu. Většina cladovaných plechů využívá slitinu Al 3003 pro svou základovou slitinu, protože je snadněji pájitelná. Proti tomu slitina Al 6063 se jako jádrová vůbec nepoužívá. Pro základové plechy při testech byly použity necladované slitiny Al 3003 a Al 6063 o síle 1,5 mm.

### 5.3 Flux

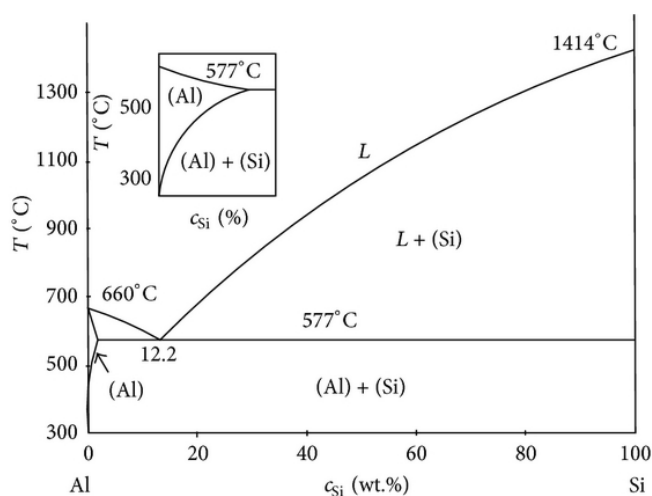
Flux je tavidlo používané při pájení hliníkových plechů. Jeho chemický vzorec je  $K_{1-2}AlF_{4-6}$ . Jak vyplývá již z definice funkce tavidel, jde o látku, která přispívá ke zlepšení tavitelnosti, smáčivosti a pájitelnosti. Také zabraňuje oxidaci pájených materiálů při pájení.

Při pokojových teplotách flux nijak neinteraguje s okolím. K tomu dochází až při zvýšených teplotách, kdy se flux stává silně redukčním a brání tvorbě oxidů kovů. Jako každé tavidlo také zajišťuje dobré zatečení pájky.

Aplikování fluxu probíhá nástřikem emulze na plechy, případně rozetřením fluxovací emulze štětcem. V této studii byl flux nanášen vždy rozprašovačem, aby bylo zajištěno jeho co nejrovnoměrnější rozložení.

## 5.4 Pasty a pájecí kroužky

Pro porovnání pájení s pomocí cladové vrstvy bylo vyzkoušeno pájení pomocí pájecích past. Existují dva druhy pájecích past. První jsou takzvané „bílé“, ty se skládají pouze z fluxu a glykolu. Druhé se nazývají „šedivé“. Ty obsahují mimo fluxu a Glykolu také určité množství křemíku Si a césia. Jelikož byly pokusy s pastami prováděny na deskách z Al 6063, bylo nutné použít šedivé pájecí pasty, které obsahují plnicí cladový materiál. Byly použity 3 druhy past. Pasty se liší obsahem křemíku uvnitř pasty a tím tedy teplotou přechodu do tekuté fáze. To je znázorněno na fázovém diagramu Al – Si. Výhoda past je v tom, že by již nemělo být potřeba fluxovat pájený materiál neboť flux se již nachází v pastě.



obr. 5-10: Fázový diagram Al-Si [20]

- Použité pasty:
- 1) Nocolok® 9028 HC II – obsahuje 7 % Si
  - 2) Nocolok® 8028 HC II – obsahuje 10 % Si
  - 3) Nocolok® 7028 HC II – obsahuje 12 % Si



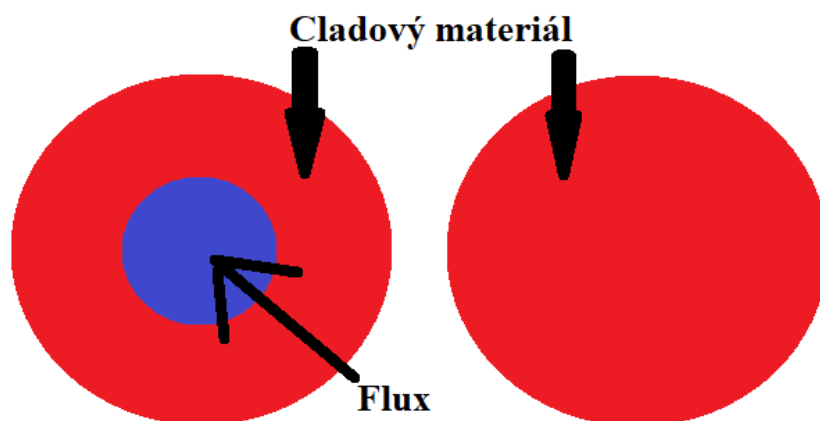
obr. 5-11: Etiketa na nádobě s césiovou pájecí pastou Nocolok® 9028 HC II.

Pájecí kroužky nebo také cladované kroužky, se prodávají jako dráty různých průměrů a délek. Pro tyto testy byly použity dva druhy těchto kroužků, a to s fluxem a bez fluxu. Vzhledem k tomu, že se ve firmě momentálně využívají pájecí kroužky na pájení bateriových chladičů, měly jednotlivé, již připravené kroužky poměrně velký průměr, a proto bylo potřeba je rozstříhat na potřebné rozměry, které budou použity na testy popsané v dalších kapitolách této bakalářské práce. Síla drátu byla v obou případech 1,6 mm a jednotlivé kroužky měly původně průměr 28 mm.



obr. 5-12: Neupravené pájecí kroužky. Vlevo kroužek bez fluxu, vpravo s fluxem.

Jak si je možné všimnout na stříhu kroužku z obrázku 5-12, kroužek bez fluxu má vyšší tažnost než kroužek s fluxem. Tedy se jedná o měkčí drát než je drát s fluxem.

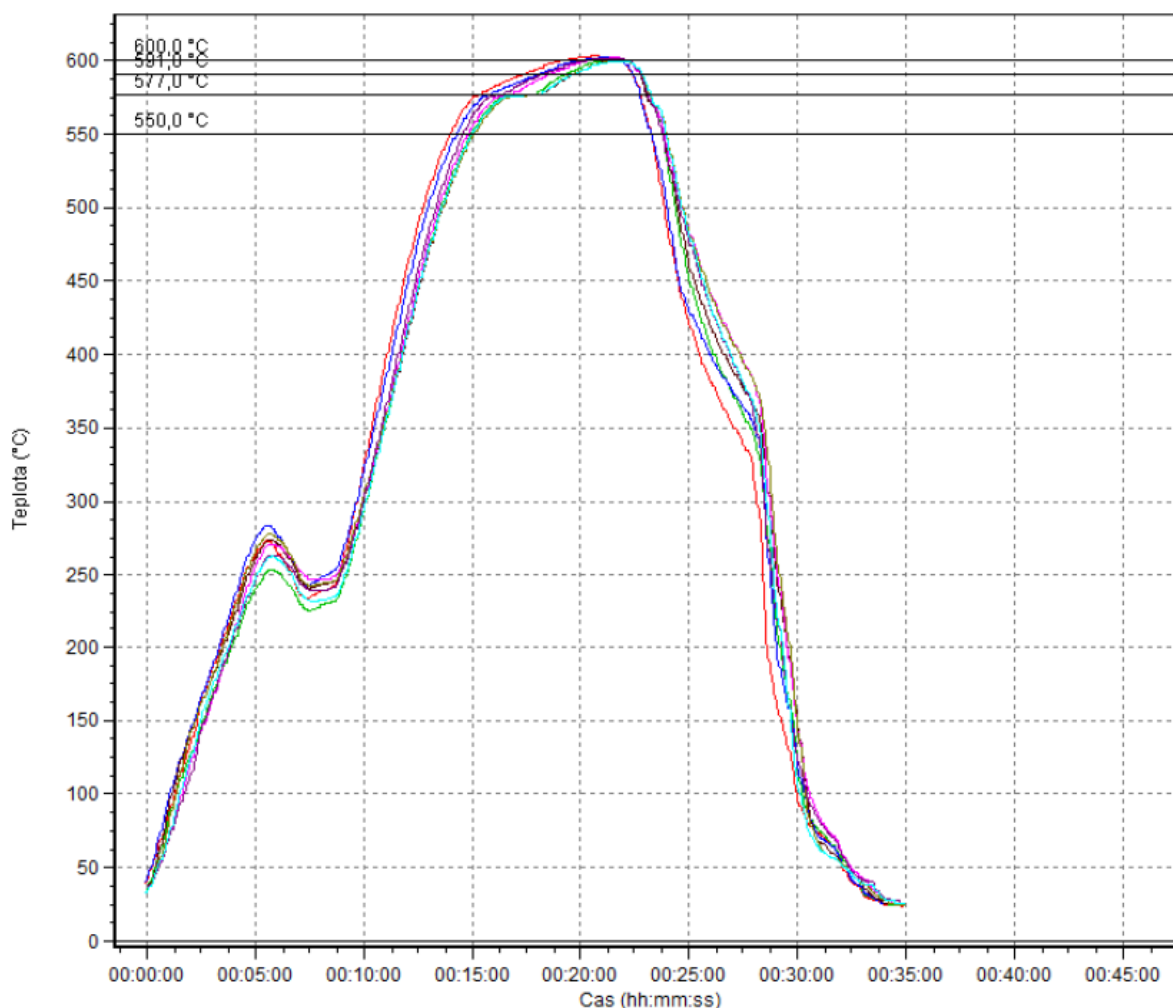


obr. 5-13: Nákras průměru kroužku s fluxem (vlevo) a bez fluxu (vpravo)



## 6 Pájení vzorků

S výše popsanými materiály bylo vytvořeno celkem 35 rozdílných variant, a to ve třech kategoriích. První kategorie byla základní plech a skrze něj připájené trubky. Druhá byla základní plech a na něm připájen plech v „M“ tvaru. Třetí varianta byla pouze pro plechy typu Al 6063 a byly to 2 plechy a mezi nimi vrstva pasty nebo cladovaný plech. Samotné pájení probíhalo v pájecí peci s kontrolovanou atmosférou (CAB), při teplotách dosahujících až 600 °C. Jednalo se o pec, ve které se pájí výparníky LUCIE, pájení tedy probíhalo za teplot potřebných pro spájení při sériové výrobě výparníků. Průběh teplot podle čidel od vstupu do pece do vyjetí ven z pece je možné vidět na obrázku 6-1.

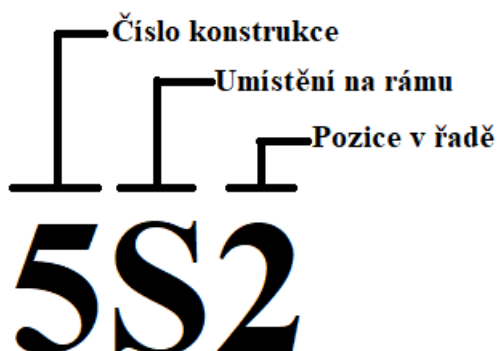


obr. 6-1: Graf průběhu teplot v peci. Data z 8 čidel

Jak je možné vidět v grafu výše, doba za kterou projede běžně výparník pecí, je 35 minut. Stejně dlouho tedy trvalo i vzorkům z této práce, než projely skrz pec. Z grafu je také vidět, že teplota nad 550 °C byla udržována více než 8 minut, což běžně stačí na spájení sériových výparníků. Také je možné si povšimnout, že teploty ze všech čidel jsou víceméně vzájemně korespondující, a tedy se dá říci, že teplota v peci byla vyvážená. Čidla totiž byla umístěna na různých místech na roštu, aby pokryly celou plochu.

## 6.1 Základová deska a skrze ní připájené trubky

První vzorky připravované na pájení byly desky se zasunutými trubkami. Byly připraveny tyto varianty:



obr. 6-2: Klíč pro rozlišení variant

### *Základová deska Al 3003*

- 3P Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 3003, 4x cladovací kroužek s fluxem
- 3Z Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 3003, 4x cladovací kroužek bez fluxu
- 2S Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 3003, 4x cladovací kroužek s fluxem
- 2Z Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 3003, 4x cladovací kroužek bez fluxu
- 1Z Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 6063, 4x cladovací kroužek s fluxem
- 2P Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 6063, 4x cladovací kroužek bez fluxu
- 1P Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 6063, 4x cladovací kroužek s fluxem
- 1S Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 6063, 4x cladovací kroužek bez fluxu

### *Základová deska Al 3003, 5 % clad 1F*

- 4P Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 3003
- 4S1 Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 3003
- 4S2 Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 6063
- 4Z Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 6063

### *Základová deska Al 6063*

- 5P Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 3003, 4x cladovací kroužek s fluxem
- 5S1 Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 3003, 4x cladovací kroužek bez fluxu
- 5S2 Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 3003, 4x cladovací kroužek s fluxem
- 5Z Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 3003, 4x cladovací kroužek bez fluxu
- 6P Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 6063, 4x cladovací kroužek s fluxem
- 6S1 Base bez fluxu, 2 + 2 trubky Al 6063, 4x cladovací kroužek bez fluxu
- 6S2 Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 6063, 4x cladovací kroužek s fluxem
- 6Z Base s fluxem, 2 + 2 trubky Al 6063, 4x cladovací kroužek bez fluxu

Jednotlivá označení na začátku vypsanych variant značí, v jakém pořadí procházely pecí a jak rozdělené byly na jednotlivých konstrukcích, na kterých procházely pecí. Např. 1P znamená, první konstrukce, přední část. „S“ Znamená střední část. „Z“ znamená zadní část.

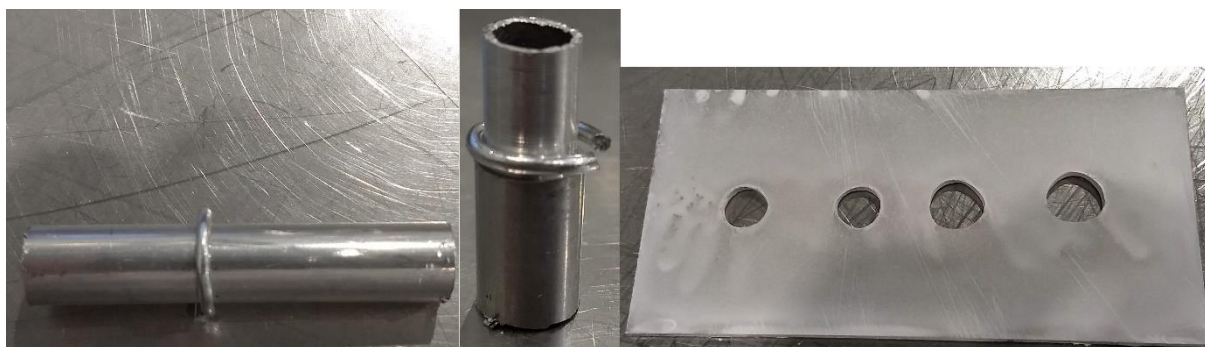
Fluxování základních desek probíhalo na fluxovací stolici v prototypové dílně a nanesení fluxu probíhalo podle klasických prototypových pravidel, aby se zachovala co největší kredibilita následných výsledků. Desky byly fluxovány z obou stran, protože i trubky se nasazovaly oboustranně. Před samotným nanášením fluxu byly plechy prohřáty horkovzdušnou pistolí, aby došlo k jejich případnému odmaštění, aby se flux nanášel rovnoměrně. Flux se nanášel na předeřhřátý plech rozprašovačem a následně se horkovzdušnou pistolí vysušil.



*obr. 6-3: Fluxování desek pro trubky*

Po fluxování se již přistoupilo k navázání trubek k základním deskám, aby se poté tato sestava přivázala ke konstrukci, která se pustila pecí.

Na obrázku 6-4 jsou ukázány jednotlivé části, které se k sobě vázaly pro každou aplikaci stejným způsobem.



*obr. 6-4: Jednotlivé součásti pro sestavu základové desky s trubkami. Vpravo základová deska z Al 6063 s naneseným fluxem. Vlevo trubka Al 6063 bez límce s nasunutým pájecím kroužkem. Uprostřed trubka Al 6063 s límcem a nasazeným pájecím kroužkem.*

Všechny varianty byly uloženy do základového plechu vždy stejným způsobem. To bylo provedeno z důvodu zajištění stejných podmínek v testech. K upevnění

vzorků na konstrukci, na které vzorky procházely pecí, byl použit běžný vázací drát používaný v prototypové dílně. Byla snaha o co nejpevnější utažení trubek vůči základovému plechu, protože při průchodu pecí dochází k velkému proudění vzduchu, a tak by se mohlo stát, že se vzorky oddělí od základních plechů. Pájecí kroužky byly vždy nasazeny tak, aby se vyzkoušelo, zda je třeba mít je umístěné vždy pouze ze svrchní strany plechu nebo, pokud se dají umístit, i ze spodní strany plechu, a dojde k zapájení. Kroužky se vždy před nasazením na trubky trochu přimáčknuly, aby po nasazení vzniklo předepětí a kroužek tak držel na trubce sám bez podpory.

Na obrázku 6-5 jsou již vzorky navázané na konstrukci a připraveny na pájení v peci.

Jako první se pájely vzorky s necladovanou základovou deskou z Al 3003.

Tyto plechy byly o 25 mm širší proti ostatním plechům, protože cívka, ze které byly plechy odstříhány, byla pouze o 25 mm širší než nakonfigurované rozměry. Proto bylo rozhodnuto o nesnižování šířky těchto plechů. Také byl tento postup zvolen proto, že nijak neovlivnil výsledky experimentu a příprava jím byla zrychlena.



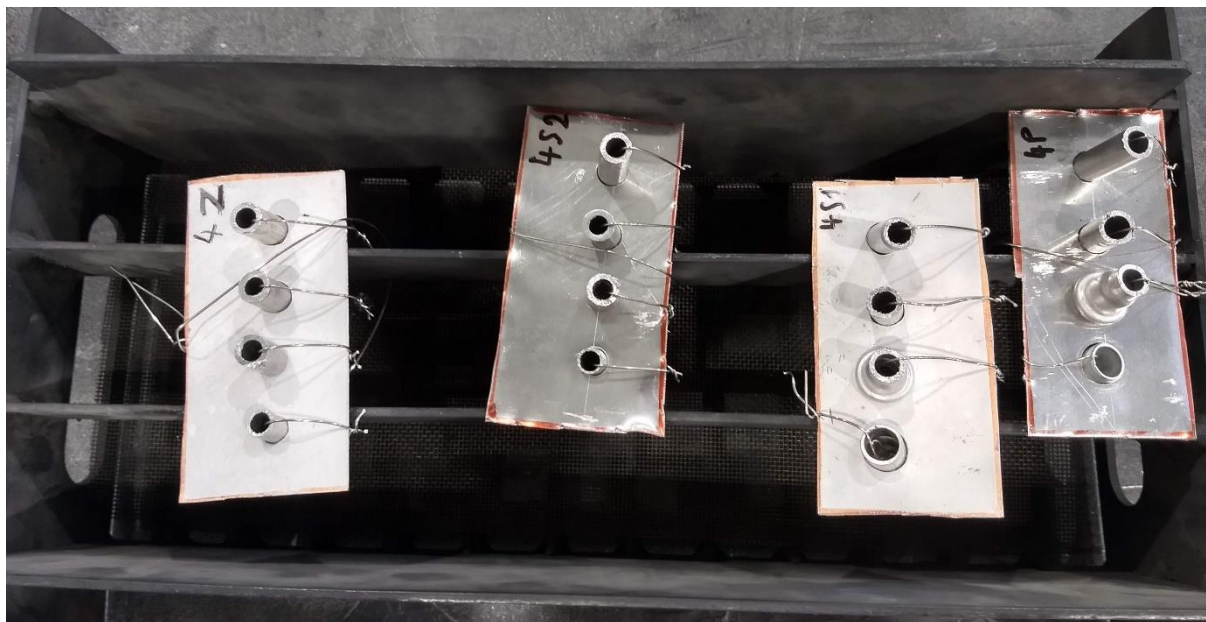
*obr. 6-5: Rozložení trubek na konstrukci s 0 % Al 3003, jako základovou deskou (s naneseným fluxem v rámečcích)*

Na obrázku 6-5 jsou k vidění obě varianty trubek, jak Al 3003, tak Al 6063. Také si lze všimnout, že některé základové desky jsou fluxované a jiné ne.

Další variantou byly vzorky, kde byl zvolen jako materiál pro základové plechy jednostranně cladovaný plech s 5 % tloušťkou vrstvy cladu. Protože se jednalo o cladovaný plech, nebyly u těchto vzorků použity pájecí kroužky.

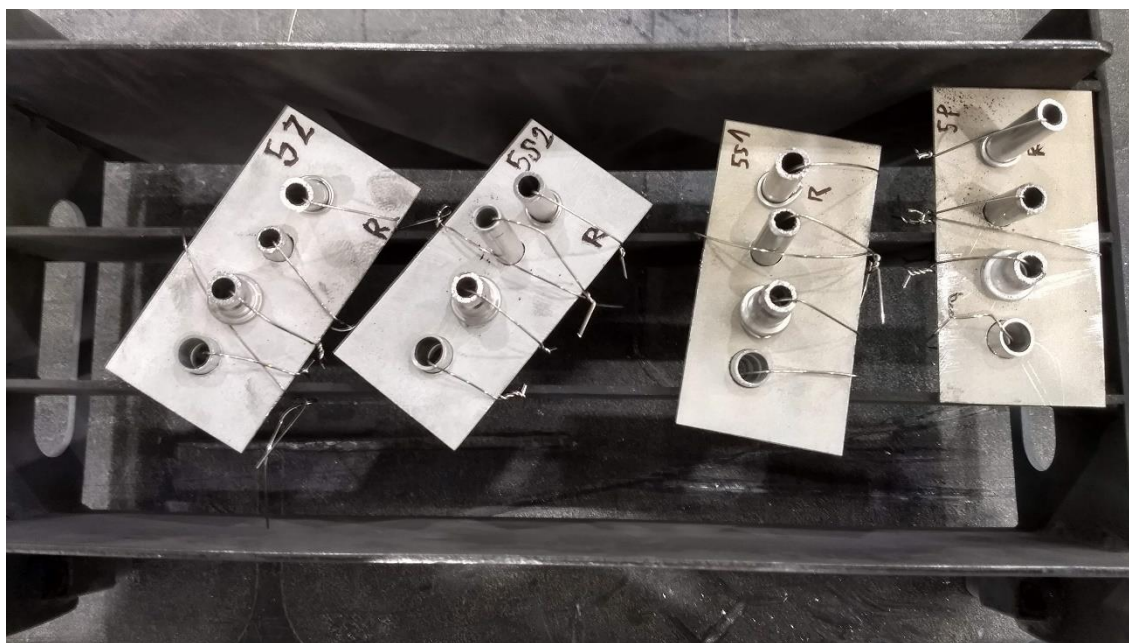


Z výše napsaných variant je zřejmé, že byly základové plechy jak fluxované, tak bez fluxu. Vzhled všech variant si je možné prohlédnout na obrázku 6-6.



*obr. 6-6: Rozložení trubek na konstrukci s 5 % jednostrannou Al 3003, jako základovou deskou*

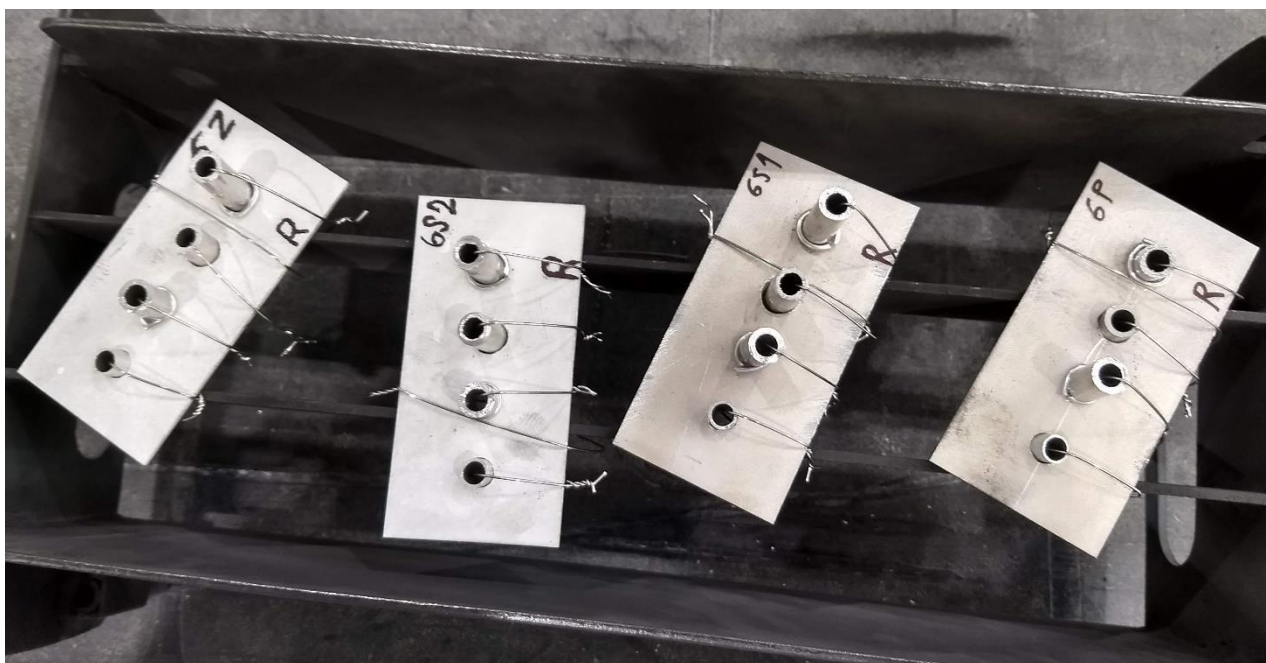
Poslední variantou s trubkami byla varianta, kde byl jako základový plech použit necladovaný plech slitiny Al 6063.



*obr. 6-7: Rozložení trubek na konstrukci s 0 % Al 6063, jako základovou deskou*

Na obrázku 6-7 je k vidění uvázaná sestava s trubkami třídy Al 3003. Místo označené „R“ je zde z toho důvodu, aby po spájení bylo možné rozeznat, kde byl umístěn kroužek shora a kde zdola.

Na obrázku 6-8 jsou trubky z hliníku třídy Al 6063.



obr. 6-8: Rozložení trubek na konstrukci s 0 % Al 6063, jako základovou deskou

Poté, co byly všechny varianty s trubkami připravené na vložení do pájecí pece, začalo se s přípravou dalších experimentů. Vyhodnocení zapájení těchto variant naleznete v kapitole vyhodnocení níže.

## 6.2 Základová deska a k ní připájený „M“ profil

Druhou variantou, která se připravovala na pájení, byly „M“ profily. Bylo 11 vzorkových verzí této varianty. Jako základová deska byla ve všech případech použita necladovaná deska Al 3003.

Výčet variant:

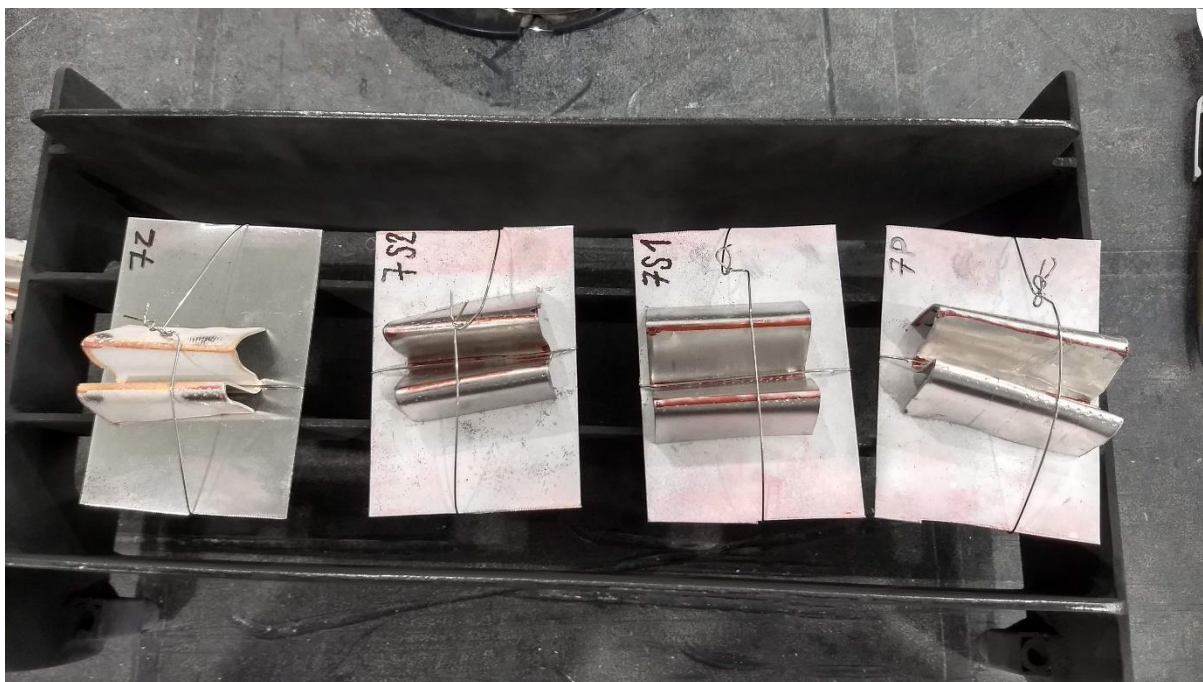
- Base s fluxem, 2F 5 % cladovaný plech bez fluxu
- Base s fluxem, 2F 7,5 % cladovaný plech bez fluxu
- Base s fluxem, 2F 11 % cladovaný plech bez fluxu
- Base s fluxem, 2F 5 % cladovaný plech s fluxem
- Base s fluxem, 2F 7,5 % cladovaný plech s fluxem
- Base s fluxem, 2F 11 % cladovaný plech s fluxem
- Base bez fluxu, 2F 5 % cladovaný plech bez fluxu
- Base bez fluxu, 2F 7,5 % cladovaný plech bez fluxu
- Base bez fluxu, 2F 11 % cladovaný plech bez fluxu
- Base bez fluxu, 1F 5 % cladovaný plech s fluxem na straně, kde je clad.

Clad na **horní** straně „M“ profilu

- Base bez fluxu, 1F 5 % cladovaný plech s fluxem na straně, kde je clad.

Clad na **spodní** straně „M“ profilu

Fluxování bylo u této varianty potřeba pouze z jedné strany, protože tyto experimenty se nekonaly oboustranně. Příprava opět probíhala přivázáním profilu k základovému plechu a následnému přivázání na konstrukci pro vložení do pece.



obr. 6-9: Rozložení „M“ profilů v sestavě s 0 % Al 3003, jako základovou deskou na konstrukci

Na obrázku 6-9 je vidět způsob uchycení profilu k základové desce a celé sestavy ke konstrukci pro pájení. Uchycení „M“ profilu k desce bylo vytvořeno uvázáním přes nejnižší místo profilu a celé to bylo poté ještě pojištěné v příčném směru.

### 6.3 Základové desky a mezi nimi pasty nebo 2 druhy cladu

Poslední varianty experimentů probíhaly pouze se základními deskami vyrobenými ze slitiny Al 6063.

Vyzkoušené experimenty:

- Base bez fluxu, cladovaný plech 2F s 11 % typ cladu 4343, base bez fluxu, cladovaný plech 2F s 10 % typ cladu 4045, base bez fluxu
- Base s fluxem, cladovaný plech 2F s 11 % typ cladu 4343, base s fluxem, cladovaný plech 2F s 10 % typ cladu 4045, base s fluxem
- Base bez fluxu, pasta 9028 HC II – 7 % Si, base
- Base bez fluxu, pasta 8028 HC II – 10 % Si, base
- Base bez fluxu, pasta 7028 HC II – 12 % Si, base



Testy s různými definicemi cladu byly provedeny, aby se zjistilo, která z těchto dvou definic je výhodnější pro použití a také která vytvoří lepší pájený spoj. Spojení do sendviče bylo použito z důvodu menší spotřeby základových plechů při tomto uspořádání. Tento pokus může být poměrně nepřesný, protože clad 4343 se podařilo sehnat v síle 1 mm, ale clad 4045 se podařilo sehnat pouze v síle 0,1 mm.



*obr. 6-10: Rozložení základových desek s pastami a různými definicemi cladu*

Pájecí pasty byly nanесeny na jeden ze dvou plechů v relativně malé vrstvě a poté na sebe byly plechy přiloženy a pevně utaženy vázacím drátem ve dvou směrech.

Na obrázku 6-11 je možné vidět rozdíly mezi jednotlivými pájecími pastami.



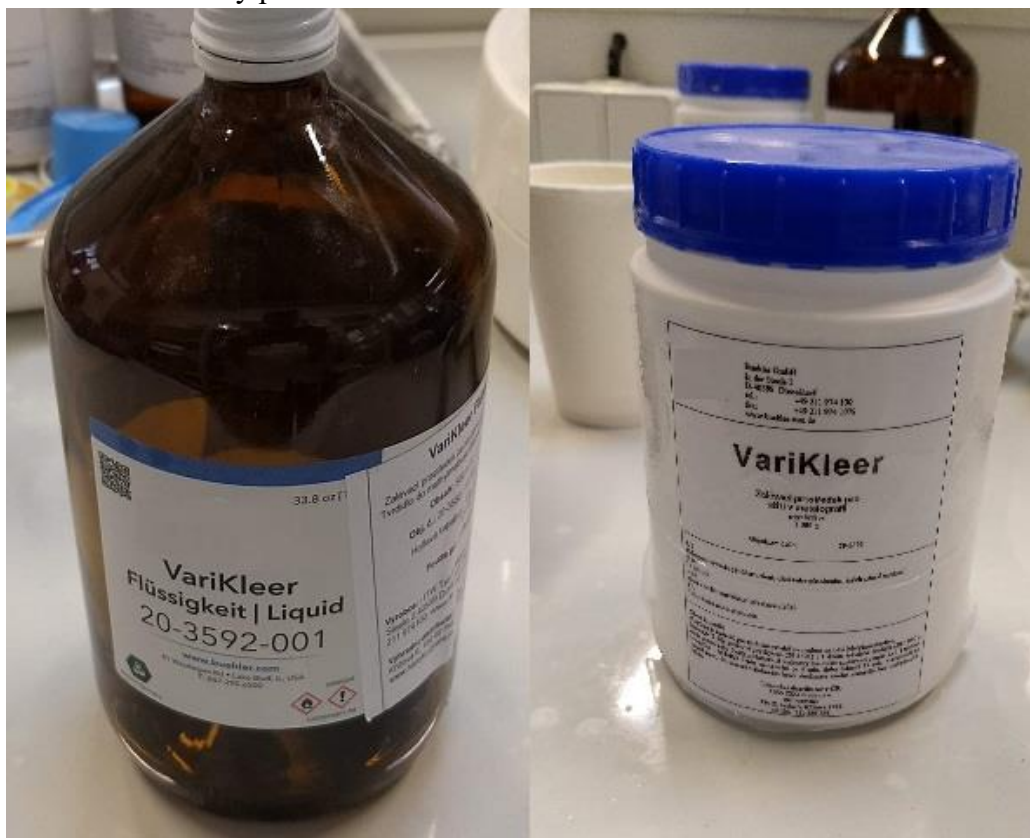
*obr. 6-11: Nanесené pájecí pasty*

Lze vidět, že se stoupajícím množstvím křemíku v pastě se její odstín stává tmavším.



## 7 Vyhodnocování vzorků

Poté, co všechny vzorky prošly pecí, byly odvázány z konstrukce a začalo se zkoumat, které spoje se zapájely. Příprava vzorků na vyhodnocení probíhala následovně. Nejprve se popsaly jednotlivé vzorky, které se měly následně vyhodnocovat. Poté se na pásové pile rozřezaly vzorky v rovině kolmé vůči spoji. Dále se zalily jednotlivé spoje do resinu, aby se daly vzorky správně vybrousit a vyleštit. Pro zalití bylo potřeba smíchat resinový prášek s tvrdidlem.



obr. 7-1: Součásti na smíchání resinu. Vlevo tvrdidlo, vpravo resinový prášek

Pro zalití byly použity nádoby o rozměrech, které odpovídají formě na brusce. Po smíchání prášku s tvrdidlem se vzorky v nádobě opatrně zalily tak, aby se vzájemně nepohnuly. To bylo z toho důvodu, aby při následném broušení byly všechny vzorky vybroušeny kolmo na spoj, a také proto, že u trubkových spojů se zalévaly 2 až 3 vzorky najednou, z důvodu zkrácení doby přípravy. Po zalití se vzorky přesunuly do tlakového hrnce, kde se nechaly vzorky vytvrdnout cca 15 minut. V hrnci byl po dobu tuhnutí tlak 3 Bar. Do tlakového hrnce se vzorky vkládaly z důvodu, aby resin nezmatněl, ale byl průzračný. Přípravu zalévání, rozložení vzorků v nádobách a vytužený vzorek v resinu naleznete na obrázku 7-2.



obr. 7-2: Zalévání vzorků do resinu. Vlevo, připravené vzorky na zalití. Dole, zalité vzorky uložené do tlakového hrnce. Vpravo, vzorek po vytuhnutí.

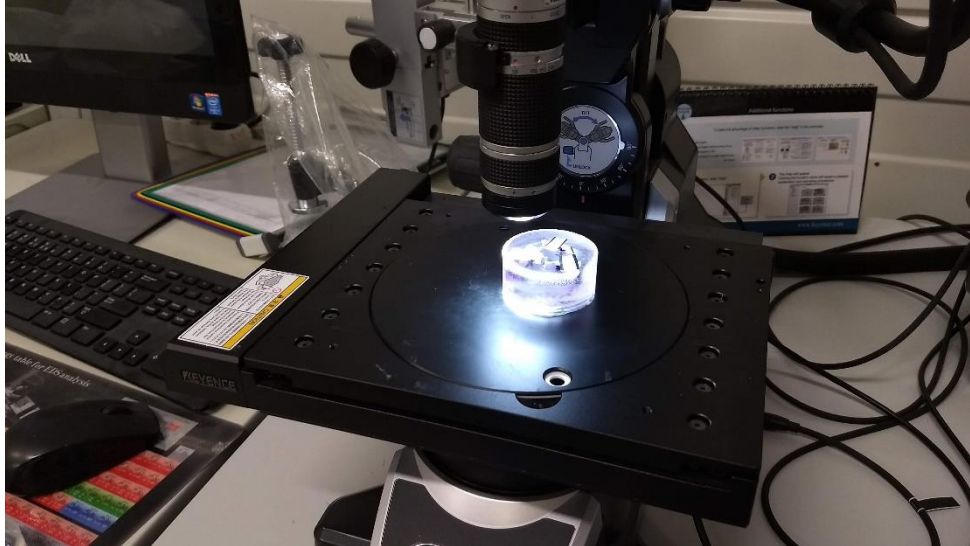
Po vytuhnutí všech vzorků se začalo s broušením a následným leštěním. Obojí probíhalo v materiálové laboratoři na brusce Buehler Phoenix 4000. Brousilo se postupně na brusných kotoučích od zrnitosti 320 až do zrnitosti 2500, za stálého zvlhčování vodou. Poté začalo leštění. Nejprve diamantovou suspenzí, bez vody, ale zvlhčované speciálním zvlhčovadlem, pro toto použití určeným. Finální doleštění bylo uděláno pomocí jemného kotouče a leštící suspenze  $\text{SiO}_2$  s názvem MASTERMET 2.



obr. 7-3: Vlevo, průběh leštění na brusce. Uprostřed, diamantová suspenze a smáčedlo. Vpravo, leštící suspenze  $\text{SiO}_2$ .

Poté, co se vzorky vyleštily, se Kellerovým činidlem (roztok 1 ml HF, 1,5 ml HCL, 10 ml HNO<sub>3</sub>, 88 ml demineralizované H<sub>2</sub>O) rozleptaly a následně se již přistoupilo ke zkoumání jednotlivých pájených spojů na digitálním mikroskopu Keyence VHX 6000.

Na obrázku 7-4 je vidět probíhající focení pájeného spoje.



*obr. 7-4: Digitální mikroskop Keyence VHX-6000*

Poté, co byly všechny vzorky nafoceny, bylo přistoupeno k jejich vyhodnocení na počítači v programu NiS Elements, kde byla změřena délka spoje a délka případných porosit.



## 7.1 Pájené spoje trubkových variant

### 7.1.1 Nespájené varianty trubkových variant

V této části budou popsány všechny varianty, u kterých se pájený spoj vytvořit nepodařilo, ať už jde o celé celky nebo jednotlivé části.



*obr. 7-5: Celkově nespájené varianty*

Z trubkových variant se celkově nezapájely pouze varianty, které měly jako základovou desku jednostranný cladovaný plech s 5% vrstvou cladu, která nebyla fluxovaná, ať už jí byly prostrčeny trubky třídy Al 3003 nebo Al 6063.

U dalších několika variant se stalo to, že některé trubky při průchodu pecí vypadly ze základové desky a nemohly se tedy zapájet. To se dělo u trubek s límcem. Dále se také dělo to, že na rovných trubkách, kde byl pájecí kroužek umístěn ze spodní strany základové desky, kroužek při průchodu pecí spadl nebo při přechodu do kapalné fáze stekl po trubce dolů. Na obrázku 7-6 si můžete tyto varianty prohlédnout.



*obr. 7-6: Vlevo - vypadlá trubka, vpravo - nezapájená trubka s odteklým cladem*

## 7.1.2 Trubky z materiálu Al 3003

Začneme s variantami, u kterých se pájely základové desky s trubkami z materiálu Al 3003. Celkem bylo analyzováno 27 různých spojů v této variantě. Z toho bylo 13 vzorků trubky s límcem a 14 vzorků trubky bez límce. Po přezkoumání všech těchto vzorků na průměrnou délku spoje a počet porosit vychází, že lepší spoj byl vytvořen u trubek z materiálu Al 3003. Délka spoje v trubce byla vypočtena sečtením délek ve dvou místech, kde byla analýza provedena. Celková průměrná délka spoje tedy vyšla u trubek Al 3003 pro límcovou variantu 3,96 mm, při průměrném počtu porosit 1 na jeden spoj. Pro rovné trubky z Al 3003 pak vyšla délka spoje 2,55 mm a 0,14 porosity na spoj. Nízký počet porosit u těchto variant je daný tím, že u velké části spojů vůbec žádné porosity nebyly. Pro ilustraci, jak byly kótované délky pájených spojů a o kterých místech se při sčítání délek spojů bavíme, si je možné prohlédnout obrázek 7-7.



obr. 7-7: Vzorek 5S1. Vlevo nahoře po pájení. Vpravo před zalitím. Dole po analýze

Celkově nezapájená varianta byla pouze 4P. Proto byla v tabulce 6 červeně zvýrazněna. U ostatních variant, kde se uvolnily pouze 1 až 2 trubky, nebyly tyto trubky do tabulky vůbec zapsané. Pouze by to zbytečně prodloužilo tabulku a data tím získaná by nebyla zase tolik hodnotná.

Vzorek	délka spoje (mm)	Počet porosit	límec	Procentuální podíl porosit na celkové délce spoje (%)
2S-1	3,245	0	Ano	0
2S-3	2,994	0	Ne	0
2Z-1	1,952	0	Ne	0
2Z-3	3,419	0	Ano	0
2Z-4	3,012	0	Ano	0
3P-2	3,074	0	Ne	0
3P-3	4,061	0	Ano	0
3Z-2	3,091	0	Ne	0
3Z-3	3,415	0	Ano	0
3Z-4	1,664	1	Ano	3,82
4P-1-4	0	0	-	-
4S1-1	1,963	0	Ne	0
4S1-2	2,106	0	Ne	0
4S1-3	4,845	0	Ano	0
4S1-4	1,174	0	Ne	0
5P-1	2,849	0	Ne	0
5P-2	2,951	0	Ne	0
5P-3	6,206	2	Ano	12,47
5P-4	3,176	0	Ano	0
5S1-1	1,996	0	Ne	0
5S1-2	2,823	0	Ne	0
5S1-3	6,368	2	Ano	9,43
5S2-1	2,537	2	Ne	7,44
5S2-3	6,06	4	Ano	13,89
5Z-1	3,063	0	Ne	0
5Z-2	3,11	0	Ne	0
5Z-3	2,689	1	Ano	6,24
5Z-4	3,282	3	Ano	4,01

Tabulka 6: Výpis variant s trubkami Al 3003 se změřenými délkami spojů a počtem porosit

Nejlepší pájený spoj se pro trubky s límcem se vytvořil u varianty 5S1-3, která měla celkovou délku spoje 6,368 mm, a dosáhlo se jí na trubce umístěné shora na základovou desku. Jednalo se o variantu, kde byla základová deska z Al 6063 bez naneseného fluxu a ani pájecí kroužek v sobě flux neobsahoval. Druhý nejlepší spoj byl vytvořen u varianty 5P-3, což byla znovu trubka umístěná shora na základovou desku a u této varianty se dosáhlo délky spoje 6,206 mm. Jednalo se o variantu se základovou desku z Al 6063 bez fluxu, avšak pájecí kroužek zde flux obsahoval. A třetí nejlepší spoj se vytvořil na vzorku 5S2-3, což bylo u varianty s fluxovanou základovou deskou z Al 6063 a pájecí kroužek také obsahoval flux. I zde byla trubka umístěna shora na základovou desku. Délka tohoto spoje byla 6,06 mm a zároveň tato varianta měla nejvyšší počet porosit a to 4. Všechny výsledky si můžete prohlédnout v tabulce 6.



Nejlepší pájený spoj pro rovné trubky se vytvořil u varianty 5Z-2. Zde byla fluxovaná základová deska z materiálu Al 6063 a pájecí kroužek byl bez fluxu. Délka spoje byla 3,11 mm. Zajímavostí je, že zde se vytvořil lepší spoj na trubce, u které byl umístěn pájecí kroužek zdola základové desky. Druhý nejlepší spoj se vytvořil u varianty 3Z-2 tedy, základové desky z Al 3003 bez fluxu a s pájecím kroužkem bez fluxu. Délka spoje byla 3,091 mm. Třetí nejlepší spoj byl vytvořen na vzorku 3P-2. Zde byla základová deska z materiálu Al 3003 bez fluxu a pájecí kroužek byl s fluxem. Pájecí kroužek byl umístěn shora na základové desce na trubce. Nejvíce porosit bylo na vzorku 5S2-1 a byly 2. Jednalo se o variantu se základovou deskou z Al 6063 s fluxem a pájecím kroužkem, který byl s fluxem.

### 7.1.3 Trubky z materiálu Al 6063

V této části bude blíže pohlédnuto na pájené spoje vytvořené s trubkami z Al 6063. U této varianty bylo analyzováno 29 různých spojů. Z toho bylo 17 vzorků trubky s límcem a 12 vzorků trubky bez límce.

Celková průměrná délka spoje tedy vyšla u trubek Al 6063 pro límcovou variantu 2,48 mm, při průměrném počtu porosit 1,76 na jeden spoj. Pro rovné trubky z Al 6063 pak vyšla délka spoje 2,20 mm a 2 porosity na spoj. Když porovnáme počty porosit u obou typů trubek, tak je vidět, že trubky z materiálu Al 6063 mají vyšší počet porosit. Na obrázku 7-8 je ukázán příkladový obrázek způsobu, jakým byla měřena délka pájeného spoje na těchto trubkách.



obr. 7-8: Trubka z materiálu Al 6063 a změřená délka spoje

Nejlepší pájený spoj u trubek s límcem byl u vzorku 1Z-1. Ten byl vytvořen ze základové desky z Al 3003 bez fluxu a s pájecím kroužkem obsahujícím flux. Délka spoje byla 3,781 mm. Druhý nejdelší spoj byl u vzorku 2P-1. Ten byl vyroben z kombinace základové desky z Al 3003 bez fluxu spolu s pájecím kroužkem bez fluxu. Délka tohoto spoje byla 3,343 mm. Třetí nejdelší spoj byl na vzorku 6P-4, který byl na základové desce z Al 6063 bez fluxu s pájecím kroužkem s fluxem. Délka tohoto spoje byla 3,015 mm. Nejvíce porosit bylo na vzorcích 6S2-4 a 6Z-3, tedy na vzorcích, které měly fluxovanou základovou desku z Al 6063 a obě varianty pájecích kroužků. Počet porosit byl 6.

Nejdelší pájený spoj u trubek bez límce byl na vzorku 1Z-3 a byla to varianta se základovou deskou z Al 3003 bez fluxu a pájecího kroužku s fluxem. Délka toho spoje byla 3,225 mm. Druhý nejdelší spoj byl u vzorku 1S-3 s délkou 2,983 mm. Tento spoj měl konfiguraci fluxované základové desky z Al 3003 a pájecího kroužku bez fluxu. Nutno dodat, že tento spoj měl také nejvíce porosit spolu se vzorky 1Z-4 a 6S2-1, a to 5. Třetí nejdelší spoj byl vytvořen na vzorku 2P-3 s délkou 2,939 mm. Zde byla konfigurace s nefluxovanou základovou deskou z Al 3003 a s pájecím kroužkem bez fluxu. Stejně jako v předchozí kapitole i zde je zvýrazněna v tabulce 7 celkově nezapájená varianta. Jednotlivé nezapájené trubky opět nebyly z důvodu přehlednosti tabulky vypsány.

Vzorek	délka spoje (mm)	Počet porosit	límeček	Procentuální podíl porosit na celkové délce spoje (%)
1P-1	2,376	1	Ano	2,7
1P-2	2,515	0	Ano	0
1P-3	2,924	2	Ne	7,32
1S-2	2,883	0	Ano	0
1S-3	2,983	5	Ne	24,81
1Z-1	3,781	1	Ano	4,4
1Z-2	2,507	1	Ano	20,72
1Z-3	3,225	0	Ne	0
1Z-4	2,782	5	Ne	17,89
2P-1	3,343	0	Ano	0
2P-2	2,892	2	Ano	5,09
2P-3	2,939	1	Ne	4,45
4S-2	0	0	-	-
4Z-1	1,234	4	Ne	24,71
4Z-2	2,216	1	Ne	10,54
4Z-3	0,971	1	Ano	11,89
4Z-4	2,386	0	Ano	0
6P-1	2,896	0	Ne	0
6P-3	2,884	2	Ano	29,47
6P-4	3,015	0	Ano	0
6S1-1	1,76	0	Ne	0
6S1-3	2,703	2	Ano	14,68
6S1-4	2,557	1	Ano	6,61
6S2-1	1,475	5	Ne	50,8
6S2-2	0,558	1	Ne	78,19
6S2-3	1,493	3	Ano	54,45
6S2-4	1,683	6	Ano	57,76
6Z-1	1,467	0	Ne	0
6Z-3	1,843	6	Ano	49,95
6Z-4	2,312	4	Ano	49,5

Tabulka 7: Výpis variant s trubkami Al 6063 se změřenými délkami spojů a počtem porosit

## 7.2 Pájené spoje „M“ profilů

V této části bude popsáno, která varianta z „M“ profilů vytvořila nejdelší pájený spoj.

Z experimentů s „M“ profilem se nezapájela pouze varianta, kde byla základová deska bez naneseného fluxu, 2F 5 % cladovaný plech bez naneseného fluxu. Jinak se všechny varianty spájely minimálně v jednom místě. Na obrázku 7-9 je vidět nezapájený vzorek.



obr. 7-9: Nezapájený „M“ profil

Skoro všechny druhy těchto spojů byly bez porosit. Jediný vzorek, který obsahoval porosity, byl 7S2-2. Šlo o variantu s fluxovaným základovým plechem a 2F 11 % cladovaným plechem.

Z hlediska zapájení je vidět, že k nezapájení v nějakém místě spoje došlo pouze u variant, které měly základový plech bez úpravy fluxováním. U těchto variant bylo zkoumáno, jaká byla vzdálenost mezi cladovaným plechem a základovou deskou, proč nedošlo k zapájení. Nejmenší vzdálenost mezi základovou deskou a „M“ profilem byla nalezena na střední části na vzorku 7Z-1, tedy u varianty se základovým plechem bez naneseného fluxu a profilem vytvořeným z 1F 5 % cladovaného plechu, kdy cladovaná strana byla umístěna jako svrchní strana profilu s fluxem na této straně. Změřená vzdálenost činila 36,47  $\mu\text{m}$ . Tato vzdálenost je menší než 0,2 mm, což je potřebná vzdálenost pro zapájení, jak bylo řečeno v předchozích kapitolách. Skutečná vzdálenost je před zapájením vyšší, protože zde byla změřena vzdálenost k natečenému cladu a ne k původní tloušťce plechu.



obr. 7-10: Vzorek 7Z-1 po změření délek spojů. Měřítka je 1000  $\mu\text{m}$

Druhá nejmenší vzdálenost byla naměřena na vzorku 8S1-1, a to 36,04  $\mu\text{m}$ . Jednalo se o variantu nefluxovaného základového plechu a profilu z 2F 7,5 %

cladovaného plechu bez fluxu. Třetí variantou s nejmenší vzdáleností bez zapájení byla varianta 8S2, tedy nefluxovaný základový plech s profilem z 2F 11 % cladovaného plechu bez fluxu.

Popis nejdelšího spoje bude ve třech částech, a to z důvodu přehlednosti po jednotlivých částech spoje. Také se ze dvou vzorků vytvoří vždy průměr, aby se urychlilo vyhodnocování. Levý i pravý krajní spoj měly ve většině případů úhel mezi profilem a základovým plechem v rozmezí 50°-90°. Prostřední spoj měl úhly v rozmezí od 30° do 50°.

Přesnost těchto experimentů je nižší, protože vlivem přípravy „M“ profilů měl každý „M“ profil trochu jinou geometrii.

## 7.2.1 Levý spoj

Nejlepší zapájení v levém spoji profilu vytvořila varianta 7P, a to 1,6225 mm. Jednalo se o fluxovaný základový plech s nefluxovaným 2F 5 % cladovaným plechem. Druhou nejlepší variantou byla 9Z, což byl fluxovaný základový plech s fluxovaným 2F 11 % cladovaným plechem s délkou spoje 1,509 mm. Třetí variantou, která vytvořila nejdelší pájený spoj, byla 9P s délkou 1,356 mm, což byl fluxovaný základový plech s 2F 5 % cladovaným plechem.

Vzorek	Levý průměr (mm)	Střed průměr (mm)	Pravý průměr (mm)
7P-1	1,62	3,34	1,46
7P-2			
7S1-1	1,21	3,95	1,16
7S1-2			
7S2-1	0,85	6,36	1,14
7S2-2			
7Z-1	1,03	0	1,18
7Z-2			
8S1-1	0,69	0	0
8S1-2			
8S2-1	1,22	0	0
8S2-2			
8Z-1	1,22	0	1,07
8Z-2			
9P-1	1,36	3,4	1,41
9P-2			
9S-1	1,02	3,34	1,05
9S-2			
9Z-1	1,51	6,05	1,11
9Z-2			

Tabulka 8: Výpis vzorků varianty s „M“ profily a jejich průměrných délek spojů

## 7.2.2 Prostřední spoj

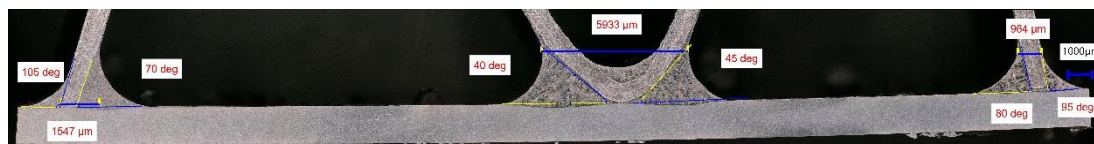
Jak z tabulky 8 vyplývá, nejdelší prostřední pájený spoj byl vytvořen u varianty 7S2 s délkou 6,36 mm. Jednalo se o fluxovaný základový plech s profilem z 2F 11 % cladovaného plechu bez fluxu. Druhý nejdelší spoj se poté vytvořil u varianty 9Z stejně jako u levého spoje. Jeho délka byla 6,05 mm. Třetí nejdelší spoj byl již se svou délkou 3,95 mm vzdálenější, a to u vzorků 7S1, tedy základového plechu s fluxem a 2F 7,5 % cladovaným plechem „M“ profilu bez fluxu.

Prostřední spoj se ukázal jako celkově nejdelší ze všech „M“ profilových spojů. Pravděpodobně to bylo způsobeno tím, že tato část profilu měla největší plochu, ze které se mohl clad rozpustit. Z tabulky 8 lze také vyčíst, že nejlepší krajní spoje se vytvořily u variant, kde byl profil vytvořen z pouze 5 % cladovaného plechu, tedy 7P a 9P. Naopak, nejdelší prostřední spoj byl vytvořen, pokud byl „M“ profil vytvořen z 11 % cladovaného plechu.

## 7.2.3 Pravý spoj

Nejdelší pravý spoj se vytvořil, stejně jako v případě nejdelšího levého spoje, u varianty 7P s délkou 1,46 mm. Stejně tak i druhý nejdelší pájený spoj byl na totožných vzorcích jako v případě levého spoje, tedy na vzorku 9P s délkou 1,41 mm. A nakonec třetí nejdelší spoj byl vytvořen na variantě 7S1, což znamená na základovém plechu s fluxem, a s „M“ profilem vytvořeným ze 2F 7,5 % cladovaného plechu, který nebyl fluxován.

Z výsledků získaných ve výše uvedených podkapitolách vychází, že nejlepší spojení bylo ve variantě se základovým plechem z Al 3003, který byl nafluxován a „M“ profilem z materiálu 2F 11 % cladovaného, který byl také fluxovaný



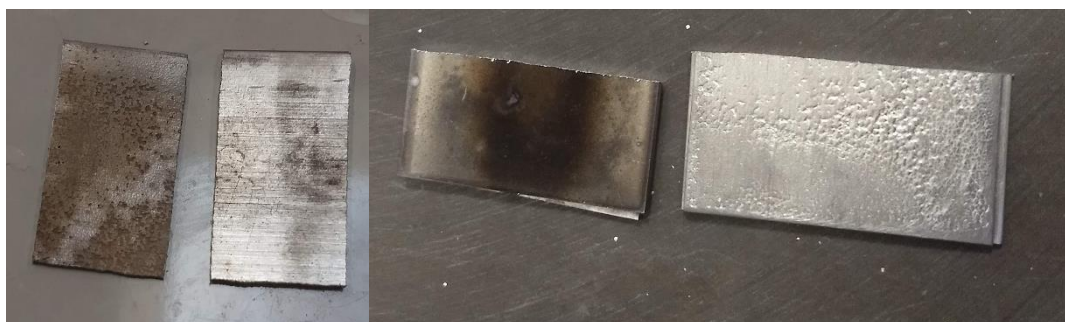
obr. 7-11: Vzorek 9Z-1 s nejlepším zapájením ze všech variant pro „M“ profily.



### 7.3 Pájené spoje rovných desek

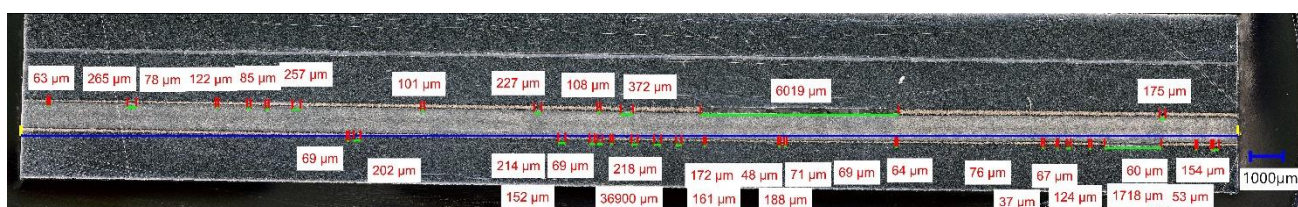
Poslední kategorií, kterou se budeme zabývat, byly varianty, kde se mezi 2 základové plechy z materiálu Al 6063 vkládal buď cladovaný plech různých specifikací nebo různé druhy pájecích past.

Z posledního druhu variant s rovnými plechy se nezapájela pouze varianta se skládanými deskami a různými druhy cladu bez nafluxování základových desek. Z této varianty se spájel pouze úsek mezi základovou deskou cladem typu 4343, avšak pouze v místě uprostřed základové desky, kdy samotný spoj bez odečtených čtyř porosit byl dlouhý pouze 9,64 mm, a to u vzorku, který byl dlouhý 40 mm.



obr. 7-12: Nezapájené desky s clady typu 4343 a 4045

Plechy s cladovou vrstvou procházely pecí složené do sendviče. To znamenalo, že desky byly naskládány následovně: základový plech, plech s cladovou vrstvou specifikace 4343, základový plech, plech s cladovou vrstvou specifikace 4045, základový plech. Plech s cladovou vrstvou typu 4343 měl sílu 1 mm a plech typu 4045 pouze 0,1 mm. To bylo dáno tím, že se nepodařilo sehnat materiály ve stejné tloušťce.



obr. 7-13: Vzorek 11-1-4343 s popsánými porositami

Nejllepší jednotlivý spoj se vytvořil na vzorku 11-1 mezi fluxovanými základovými plechy s cladem typu 4343 a jeho délka činila 30,971 mm. Je třeba dodat, že délka vzorkových plechů pod mikroskopem byla z důvodu velikosti nádob pro zalití resinem zúžena na 40 mm. Avšak po zprůměrování hodnot z obou vzorků na každém plechu vychází nejlépe varianta s použitím pájecí pasty 7028 HC II, která obsahuje 12 % Si. Zprůměrovaná délka spoje zde činí 28,015 mm. Druhá poté byla varianta s fluxovanými plechy a cladovaným plechem třídy 4343 s průměrnou délkou spoje 26,498 mm. Třetí nejdelší spoj vytvořily varianty 10S1 s pájecí pastou 9028 HC II, která obsahuje 7 % Si. Nejvíce porosit obsahovaly varianty 10S2 a 10Z, jež měly stejný počet porosit na spoj. V relativní blízkosti za nimi poté byla varianta s cladovaným plechem 4045.



Vzorek	Celková délka měřeného vzorku (mm)	Procentuální podíl porosit na celkové délce spoje (%)	Délka spoje (mm)	Počet porosit
10P-4343	35	58,56	9,636	4
11_1_4343	37	16,07	30,971	17
11_1_4045	37	57,71	15,605	65
11_2_4343	37	40,01	22,025	22
11_2_4045	37	62,21	13,874	51
10S1-1	40	36,17	25,534	55
10S1-2	40	49,57	20,174	47
10S2-1	40	60,07	15,974	54
10S2-2	40	47	21,201	63
10Z-1	40	29,06	28,375	63
10Z-2	40	30,865	27,654	54

*Tabulka 9: Výpis vzorků s počtem porosit a délkou spoju*

## 8 Závěr

Zadáním této bakalářské práce bylo zkonstruovat optimální design pájeného spoje výměníku, který by se mohl použít pro prototypovou výrobu na bateriové chladiče a výparníky.

Byly zkonstruovány tři různé kategorie spojů, které byly následně experimentálně ověřeny na celkově více než čtyřiceti vzorcích.

Ze závěrů experimentů se dá říci, že se potvrdily předpokládané vlivy. Například vliv umístění trubek do základového plechu shora nebo zdola.

Dále byl velmi zřetelně poznatelný vliv fluxování, tedy přidání tavidla mezi spojované součásti, kdy se v určitých případech varianty bez nafluxování vůbec nezapájely. Jednalo se především o varianty s kódovým označením 4S2, 8P.

Také bylo možné sledovat jev kapilarity. Pokud totiž byla zachována kapilární mezera menší než 0,2 mm, což je horní mez pro zapájení při použité metodě, tak došlo k zapájení vzorků.

Dalším z vlivů, který bylo možné sledovat, byl vliv tvaru vzorků. Například rozdíl v délce spojů mezi trubkami s „límce“ (které měly všeobecně delší spoj) a bez „límce“. To bylo dáno větší plochou „límce“ trubek, na kterých rozpuštěný clad mohl zaujmout větší plochu vůči základovému plechu, proti trubkám bez „límce“. Dále vliv ne vždy zcela rovných základových plechů, spolu s ruční nepřesnou výrobou „M“ profilů, který u některých variant, zapříčinil horší kvalitu pájených spojů.

Pokud by se měly potvrdit poznatky z této práce, bylo by potřeba od každé varianty udělat alespoň 3 experimentální vzorky, aby se daly výsledky určit přesně.

Jistě by přesnějším výsledkům pomohl nějaký přípravek, který by trubky v základovém plechu uchytil pevněji a kolmo na plech.

Dále by bylo potřeba vytvořit přípravky na přesnou výrobu „M“ profilů tak, aby byla zajištěna stejná geometrie pro všechny profily.

Také by stálo za zvážení vytvořit nějaké svěrné přípravky, které by uchytily vzorky v peci a zajistily by stálý přítlak po celou dobu pájení lépe než svázání vázacím drátem.

V neposlední řadě by bylo dobré, aby měly všechny zkoušené vzorky stejné rozměry a sílu. To se týká i plechů s cladovanou vrstvou různých specifikací cladu, kde by výsledky pokusů nemusely přinést stejné výsledky, pokud by byla síla cladované vrstvy obou plechů totožná.

Všechny výše uvedené faktory byly zjištěny až v průběhu experimentů, a proto nebyly využity. Také by to znamenalo vyšší náklady na experimenty, než když proběhly stávajícím způsobem.

## 9 Použité zdroje

[1] – Logo Valeo. In: *Valeo* [online]. [cit.2020-08-07]. Dostupné z:

<http://www.valeo.cz/cs/valeo-in>

[2] – Pohled na továrnu Valeo v Žebráku. In: *Odbory valeo* [online]. [cit. 2020-08-07].

Dostupné z: <http://www.odbornyvaleo.cz/zebrak>

[3] – Obrázky schéma klimatizace a druhů výparníků. In: *Diplomová práce Jakub JIRSA* [online]. [cit.2020-08-07]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/11369255-Diplomova-prace-zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-strojni-studijni-program-n2301-strojni-inzenyrstvi.html>

[inzenyrstvi.html](http://docplayer.cz/11369255-Diplomova-prace-zapadoceska-univerzita-v-plzni-fakulta-strojni-studijni-program-n2301-strojni-inzenyrstvi.html)

[4] – BUREŠ, V.; ŠIMEK, M. Klimatizace v automobilech. In: Archiv prací pro 30. ročník SOC: 12. tvorba učebních pomůcek, didaktická technologie [online]. [s.l.] : [s.n.], 2008

[cit.2020-08-07]. Dostupné z: <http://soc.nidv.cz/archiv/rocnik30/obor/12>

[5] – CHYSKÝ, J. *Klimatizace*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1987. 232 s.

[6] – NOŽIČKA, J. *Základy termomechaniky*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2004. 187 s.

[7] – COOK, J. *The human fingerprint in global warming*. [online].; 2010 [cit.2020-08-07].

Dostupné z: <https://skepticalscience.com/human-fingerprint-in-global-warming.html>

[8] – Garcia et. Al.: Braz3 – vnitropodnikový školící materiál, Valeo THS – nepublikováno, 2005

[9] – Applications–Power train – Heat exchangers 2017 [cit. 2020-08-07]. Dostupné z:

<https://european-aluminium.eu/media/1583/aam-applications-power-train-7-heat-exchangers.pdf>

[10] – MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. 700 s.

[11] – Controlled Atmosphere Aluminum Brazing Systems [cit. 2020-08-07]. Dostupné z:

<https://www.secowarwick.com/wp-content/uploads/assets/Documents/Brochures/Controlled-Atm-Alum-Brazing-Systems.pdf>

- HOSNEDL, S.; KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra – Obecné strojní části I.* : Computer Press, 2002

- CHYSKÝ, J.; HEMZAL, K. *Větrání a klimatizace*. Praha: Bolit – B, 1993

- VALEO, *Multi – Channels Evaporator 38 mm „LUCIE“ Functional Specifications.*: 2015

- *Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

## **10 Seznam příloh**

Příloha č. 1: Upřesnění zadání bakalářské práce firmou VALEO

## *Příloha č. 1*

# **UPŘESNĚNÍ ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE FIRMOU VALEO**

Jméno a příjmení: **Vojtěch Jindra**  
Studijní obor: **B2301**

**Téma bakalářské práce:**

**Konstrukce neúnikových pájených spojů, pro použití v prototypové výrobě výměníků pro automobilový průmysl**

### **Základní požadavky:**

Navrhnout optimální design konstrukce pájeného spoje výměníku, který bude používán v rámci prototypové fáze vývoje výměníku. Najít nejlepší variantu spoje, pro tři různé varianty spojů.

### **Základní údaje:**

Technické parametry, specifikace výparníku, trubek, materiálu a Valeo normy budou poskytnuty firmou Valeo výměníky tepla k.s. Využití CAD stanice, prototypové dílny a laboratoře bude poskytnuto firmou Valeo. Obsah bakalářské práce se nebude nijak dotýkat vnitřních částí výparníku spojené s know-how společnosti.

### **Upřesnění základních požadavků:**

- 1. Popište současný stav techniky, výměníku - výparníku s jeho výhodami a nevýhodami.*
- 2. Popište konstrukční řešení sériového a prototypového výparníku.*
- 3. V rámci prototypového řešení navrhnete několik konstrukčních spojů mezi komponentami s cílem zabezpečit mechanicky pevný, nerozebíratelný a těsný spoj s minimem porozit ve spoji.*
- 4. Pro tyto konstrukční spojení poptejte materiál na přípravu vzorků.*
- 5. Vzorky nechte spájet v peci a analyzujte kvalitu pájení za spolupráce s laboratoří.*
- 6. Z testovaných vzorků vyberte nejvhodnější řešení pro prototypové konstrukční řešení.*

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Lukáš Kopal**  
**Valeo výměníky tepla k.s**

Datum zadání bakalářské práce: **04.06.2019**